

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Metody simulace hydraulického rázu - vícefázové proudění

Methods of Simulation of Hydraulic Shock - Multiphase Flow

Student: Bc. Martin Fajka

Vedoucí diplomové práce: prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Fajka**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T043 Hydraulika a pneumatika
Téma: **Metody simulace hydraulického rázu - vícefázové proudění**
Methods of Simulation of Hydraulic Shock - Multiphase Flow
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Zpracujte teoreticky a matematicky problematiku dynamického chování sloupce kapaliny v aplikaci na hydraulický ráz při proudění vody v nízkotlakém hydraulickém systému.

1. Teorie dynamiky sloupce kapaliny, vliv vzduchu na parametry periodického děje a modul pružnosti kapaliny.
2. Popis zařízení pro měření hydraulického rázu, experimentální vyhodnocení hydraulického rázu a dynamických parametrů.
3. Metody modelování hydraulického rázu (1D model, 3D model).
4. Modelování hydraulického rázu simulační metodou užitím SimHydraulics a 2D modelováním užitím ANSYS FLUENT.
5. Zhodnocení variant řešení a porovnání s experimentem.

Seznam doporučené odborné literatury:

- ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.
- MILLER, D. S.: *Internal Flow System*, BHRA UK, 396 s., ISBN 0-947711-77-5.
- KOZUBKOVÁ, M. a kol.: *Mechanika tekutin, návody pro laboratorní cvičení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 113 s. (Elektronická publikace na CD ROM).
- KOZUBKOVÁ, M.: *Simulace a modelování hydraulických systémů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009. 149 s. (Elektronická publikace na CD ROM).
- KOZUBKOVÁ, M.: *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008, 115 s., ISBN 978-80-248-1913-6, (Elektronická publikace na CD ROM).
- KOZUBKOVÁ, M. a kol.: *Modelování přenosu hmoty, hybnosti a tepla*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011, 115 s., ISBN 978-80-248-1913-6, (Elektronická publikace na CD ROM).
- Ansys, Inc. *ANSYS FLUENT 15 - Theory Guide*. 2013.
- Ansys, Inc. *ANSYS FLUENT 15 - Theory Guide*. 2013.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017

doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry

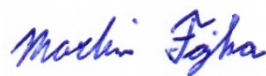
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15. 5. 2017



.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15. 5. 2017



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Martin Fajka

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Zahradní 657, Hradec nad Moravicí

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

FAJKA, M. *Metody simulace hydraulického rázu - vícefázové proudění: diplomová práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2017, 71 s. Vedoucí práce: Kozubková, M.

Diplomová práce se zabývá metodami simulace hydraulického rázu v nízkotlakém hydraulickém systému. Na začátku práce je popsána problematika stlačitelnosti kapalin, konkrétně vliv obsahu vzduchu a modulu pružnosti kapaliny. Dále je uvedena teorie hydraulického rázu a popsány metody jeho zkoumání. V další kapitole je zobrazen obvod, na kterém bylo měření provedeno a zpracovány výsledky měření. Následně byly vytvořeny matematické modely pro simulaci hydraulického rázu v programech Matlab SimHydraulics a ANSYS Fluent. V poslední části diplomové práce jsou výsledky měření porovnány s matematickými modely.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

FAJKA, M. *Methods of Simulation of Hydraulic Shock - Multiphase Flow: Master Thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulics Equipment, 2017, 71 p. Thesis head: Kozubková, M.

This master thesis deals with methods of hydraulic shock simulation in the low-pressure hydraulic system. At the beginning of the work is described the problem of compressibility of liquids, namely the influence of air content and the modulus of fluid elasticity. Further, the theory of hydraulic shock is introduced and the methods of researches were specified. The circuit on which the measurements were made and the results of the measurements are described in the next chapter. Subsequently, mathematical models for hydraulic simulation were developed in the Matlab SimHydraulics and ANSYS Fluent programs. In the last part of the master thesis are measured results compared with the mathematical models.

Obsah

	strana
Seznam použitého značení	8
1. Úvod	11
2. Stlačitelnost kapalin	12
2.1. Stanovení modulu pružnosti kapaliny	12
2.2. Rozpuštěný vzduch v kapalině	13
2.3. Nerozpuštěný vzduch v kapalině	14
3. Teorie o hydraulickém rázu	17
4. Použité metody zkoumání	18
4.1. Experimentální metoda	19
4.2. Jednorozměrná analýza - Matlab - SimHydraulics	19
4.2.1. Elektrohydraulická analogie	20
4.2.2. Segmentové potrubí	21
4.3. Vícerozměrná analýza - ANSYS Fluent	23
4.3.1. Porézní prostředí	23
4.3.2. Časově závislé řešení	24
5. Měření	25
5.1. Popis obvodu	25
5.2. Charakteristika čerpadla	27
5.3. Charakteristika clony	28
5.4. Charakteristika kulového kohoutu	29
5.5. Měření hydraulického rázu	30
6. Simulace	32
6.1. Matlab - SimHydraulics	32
6.1.1. Schéma obvodu	32
6.1.2. Nastavení použitých prvků	34
6.1.3. Výsledky simulace	40
6.2. ANSYS Fluent	42
6.2.1. Tvorba geometrie	42
6.2.2. Tvorba sítě	43
6.2.3. Nastavení Fluentu	46
6.2.4. Výsledky simulace	53
7. Porovnání výsledků	54
8. Závěr	57
9. Seznam použité literatury	60
10. Seznam příloh	62

Seznam použitého značení

a	zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
a_s	skutečná rychlost zvuku	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
a_t	teoretická rychlost zvuku	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
C	hydraulická kapacita	$[\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^4 \cdot \text{s}^2]$
C_2	koeficient změny tlaku	$[\text{m}^{-1}]$
c_p	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
c_V	měrná tepelná kapacita při konstantním objemu	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
D	hydraulický odpor proti deformaci	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-2}]$
d	vnitřní průměr	$[\text{m}]$
E	modul pružnosti stěny	$[\text{Pa}]$
f	frekvence běhu vlny	$[\text{s}^{-1}]$
g	tíhové zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
H	dopravní výška	$[\text{m}]$
h	výška hladiny	$[\text{m}]$
h_z	ztrátová výška	$[\text{m}]$
K	objemový modul pružnosti	$[\text{Pa}]$
k	absorpční součinitel	$[1]$
L	hydraulický odpor proti zrychlení	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-4}]$
l	délka potrubí	$[\text{m}]$
n	otáčky	$[\text{min}^{-1}]$
n	polytropický koeficient	$[1]$
P	příkon	$[\text{W}]$
P_h	výkon	$[\text{W}]$
p	Pfeiderův součinitel	$[1]$
p	tlak	$[\text{Pa}]$
p_a	atmosférický tlak	$[\text{Pa}]$
Q	objemový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
Q_D	návrhový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
R	odporový koeficient	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-7}]$
R_{lin}	laminární (linearizovaný) odpor proti pohybu	$[\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-5}]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[1]$
r	měrná plynová konstanta	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
S	plocha	$[\text{m}^2]$
s	tloušťka stěny	$[\text{m}]$

T	teplota	[°C]
T	absolutní teplota	[K]
T	doba běhu vlny	[s]
t	čas	[s]
t	tloušťka vrstvy	[m]
t_p	perioda vlny	[s]
V	objem	[m ³]
v	rychlost v potrubí	[m·s ⁻¹]
v_0	rychlost v potrubí po uzavření ventilu	[m·s ⁻¹]
Y_C	měrná energie čerpadla	[J·kg ⁻¹]
Y_S	skutečná měrná energie čerpadla	[J·kg ⁻¹]
Y_{∞}	měrná energie čerpadla z Eulerovy rovnice	[J·kg ⁻¹]
Δh	rozdíl výšek hladin	[m]
Δp	tlaková ztráta	[Pa]
Δt	rozdíl časů	[s]
Δv	rychlostní difference	[m·s ⁻¹]
α	propustnost porézní vrstvy	[m ²]
α	objemový zlomek plynu ve směsi	[1]
ζ	ztrátový součinitel	[1]
ζ	obecná skalární veličina	
η	dynamická viskozita	[Pa·s]
η	účinnost	[1]
η_h	účinnost hydraulická	[1]
κ	von Kármánova konstanta	[1]
μ	průtokový součinitel, výtokový součinitel	[1]
ν	kinematická viskozita	[m ² ·s ⁻¹]
π	Ludolfovo číslo	[1]
ρ	hustota	[kg·m ⁻³]

Indexy:

C	hydraulická kapacita
g	plyn
k	kapalina
L	hydraulický odpor proti zrychlení
R	hydraulický odpor proti pohybu
RL	hyd. odpor proti pohybu + hyd. odpor proti zrychlení
ref	referenční
s	směs
$stat, dyn, tot$	statický, dynamický, totální
v	vzduch
vr	rozpuštěný vzduch

Seznam značení ve schématu obvodu

C	clona
HG	čerpadlo
DM	diferenční manometr
DT	digitální tlakoměr
H	hadice
KK	kulový kohout
N	nádrž
U	obrácená u - trubice
S_1, S_2, S_3	snímače tlaku

1. Úvod

Práce se zabývá teorií hydraulického rázu, jeho měřením a následně metodami, kterými je možno tento děj simulovat v počítačových programech. Ráz vzniká na dlouhých úsecích potrubí při rychlém uzavření nebo otevření regulační armatury. Poté dochází k nárůstu tlaku, který negativně ovlivňuje jednotlivé prvky v obvodu a tím i celkovou jeho funkci.

Díky velkému rozšíření výpočetní techniky je dnes snadné ověřit chování prvků a funkci celého obvodu ještě před jeho fyzickou realizací nebo zjistit příčinu problému na již provozovaném zařízení. K tomuto účelu slouží počítačové programy, které umožňují poměrně přesně daný jev simulovat pomocí různých matematických modelů. Výhodou těchto modelů je možnost navrhnout několik řešení daného problému a poté zvolit takové, které počítá dostatečně přesně v rozumném výpočetním čase.

Na základě experimentu je možno zjistit rozměry obvodu a základní informace o proudící tekutině. Pro správné nastavení matematického modelu je nutné proměřit charakteristiky prvků použitých v obvodu, případně určit jejich ztrátové a průtokové součinitele.

V této práci byl ráz simulován pomocí dvou programů. První matematický model byl řešen v počítačovém programu Matlab (jednorozměrné proudění), přesněji pomocí jeho nástaveb Simulink a SimHydraulics. Druhý model byl zhotoven v programu ANSYS Fluent (vícerozměrné proudění). V závěru jsou prezentovány a porovnány výsledky naměřených a simulovaných průběhů hydraulického rázu.

2. Stlačitelnost kapalin

V hydraulických kapalinách se vzduch vyskytuje ve dvou variantách. První případ je nerozpuštěný (tedy směs kapaliny a vzduchu). Ve druhém případě se jedná o rozpuštěný vzduch. Z důvodu přítomnosti vzduchu v kapalině se její stlačitelnost definuje modulem pružnosti, to způsobuje dynamický průběh proudění. Příkladem takového průběhu je hydraulický ráz, který může vzniknout při náhlém uzavření nebo otevření ventilu v jednoduché soustavě nádrž - čerpadlo - potrubí - ventil [1].

Modul pružnosti kapaliny se ve většině úloh předpokládá konstantní nebo se intuitivně sníží o 10 - 50%. Tento krok ale nepříznivě ovlivňuje výsledek řešení a vzniknou velké nepřesnosti ve srovnání s experimentálními úlohami, zejména u dynamických úloh.

Modul pružnosti podle definice $d\rho = \frac{\rho}{K} dp$ mění hustotu kapaliny, tedy:

$$\rho = \rho_{ref} \cdot \left(1 + \frac{p - p_{ref}}{K}\right) \quad (2.1)$$

kde: p - absolutní tlak

Existuje rozdíl mezi hodnotou statického a dynamického modulu pružnosti, jejich podíl odpovídá poměru měrných tepelných kapacit kapaliny. Stanovení hodnoty statického i dynamického modulu pružnosti není jednoduché. Přibližně lze definovat [1]:

$$\frac{K_{dyn}}{K_{stat}} = \frac{c_p}{c_v} \quad (2.2)$$

2.1. Stanovení modulu pružnosti kapaliny

Modul pružnosti kapaliny K_k musí být určen dostatečně přesně, protože ve velké míře ovlivňuje výsledek řešení. Metody, kterými ho lze určit, jsou založeny na těchto principech:

- Měření hustoty
- Měření rychlosti vzduchu
- Anemometrie
- Metoda odebírání vzorků
- Kapacitní metody
- Fotoelektrické metody

Výpočet modulu pružnosti ze základní definice, tedy ze změny objemu při změně tlaku, není dostatečně přesný, protože nezohledňuje závislost modulu pružnosti na čase.

Další metoda je experimentální, kdy se při hydraulickém rázu určí doba běhu vlny a dále pak rychlost zvuku. Takto získaný modul pružnosti je ale nezávislý na čase a tlaku, také již obsahuje vzduch. Proto je výpočet s tímto modulem nepřesný a nelze z něj určit objemové množství vzduchu, což je zásadní pro numerické modelování proudění kapalin v hydraulických prvcích. Při numerickém modelování, které využívá prostorový model hydraulického prvku, se stává, že se vzduch nahromadí za ostrými hranami. Vytvoří se prostory o větším objemovém množství vzduchu než v dalších oblastech. Směs kapaliny a vzduchu se pak nebude chovat jako homogenní směs. V takových případech se využívá model vícefázového proudění nehomogenní směsi (kapalina - vzduch) [1].

2.2. Rozpuštěný vzduch v kapalině

Rozpouštění vzduchu v kapalině je popsáno Henryho zákonem:

$$V_{vr} = V_k \cdot k \frac{p_2}{p_a} \quad (2.3)$$

kde: V_{vr} - objem rozpuštěného vzduchu v kapalině

V_k - objem kapaliny

k - absorpční součinitel

p_2 - tlak na konci děje

p_a - atmosférický tlak

Se stoupajícím tlakem se objemový zlomek vzduchu zvyšuje a je mírně závislý na teplotě (při teplotě 20 - 80°C je téměř konstantní). Při změně tlaku nebo teploty dojde k porušení rovnovážného stavu, kdy byla kapalina nasycena vzduchem. Začnou se uvolňovat molekuly vzduchu a vznikat bubliny (vznikne směs kapaliny a vzduchu) nebo se naopak vzduch začne v kapalině rozpouštět. Tato přeměna je závislá na čase. Dále může tato nehomogenní směs vzniknout špatně konstruovanými výtoky, kdy dojde k provzdušnění kapaliny nebo přísáváním vzduchu netěsnostmi v hydraulickém systému. Uvolněný vzduch zhoršuje mechanické vlastnosti u kapalin, zejména u olejů dochází k rychlejšímu stárnutí (Dieselův efekt) [1].

2.3. Nerozpuštěný vzduch v kapalině

Obecně kapalinu uvažujeme jako vícefázovou homogenní směs kapaliny a malého objemového množství vzduchu. Vícefázový model potom řeší proudění jako směs kapaliny a vzduchu, kterého je do dvou procent (pro vodu). Hustota je pak dána na základě hustoty pro vícefázový model. Modul pružnosti se počítá takto:

Modul pružnosti čisté kapaliny bez vzduchu je dán vztahem [1]:

$$K_k = -V_k \frac{dp}{dV_k} \quad (2.4)$$

kde: K_k - modul pružnosti čisté kapaliny

V_k - objem kapaliny

Modul pružnosti směsi kapaliny se vzduchem potom:

$$K = -V \frac{dp}{dV} \quad (2.5)$$

kde: $V = V_k + V_g$ - objem směsi

V_g - objem plynu v kapalině při referenčním tlaku

Ze stavové rovnice lze odvodit objem plynu v závislosti na tlaku p [1]:

$$p_{ref} \cdot V_{g_{ref}}^n = p \cdot V_g^n \rightarrow V_g = V_{g_{ref}} \cdot \left(\frac{p_{ref}}{p_{ref} + p} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.6)$$

kde: p - relativní tlak

n - polytropický koeficient

referenční hodnoty jsou dané

Relativní obsah plynu v kapalině se potom definuje jako:

$$\alpha = \frac{V_{g_{ref}}}{V_k} \quad (2.7)$$

Modul objemové pružnosti je podrobně odvozen v literatuře [1] a jeho konečný tvar je:

$$K = K_k \frac{1 + \alpha_v \left(\frac{p_{ref}}{p_{ref} + p} \right)^{\frac{1}{n}}}{1 + \alpha_v \cdot K_k \frac{p_{ref}^{\frac{1}{n}}}{n(p_{ref} + p)^{\frac{n+1}{n}}}} \quad (2.8)$$

Pokud je v kapalině vysoký tlak, obsahuje také malé objemové množství nerozpuštěného vzduchu, které ale nemá významný vliv na modul pružnosti. Pro řešení hydraulických obvodu (s kapalinou definovanou jako homogenní směs kapaliny a vzduchu) a při použití jednorozměrných metod řešení hydraulického rázu je tato zjednodušená metodika řešení proudění stlačitelné kapaliny dostačující s určitou přesností.

Jednodušší výpočet modulu pružnosti lze provést pomocí vzorce:

$$K = \frac{K_k \cdot n \cdot p}{n \cdot p + \alpha(K_k - n \cdot p)} \quad (2.9)$$

kde: p - absolutní tlak

Pokud je směs kapaliny a vzduchu při proudění v hydraulických prvcích zvláště za ostrými hranami nehomogenní používá se klasický vícefázový model a hustota směsi se poté počítá jako [1]:

$$\rho_s = \alpha_v \cdot \rho_v + \alpha_k \cdot \rho_k \quad (2.10)$$

kde: α_v - objemový zlomek vzduchu

α_k - objemový zlomek kapaliny

ρ_v - hustota vzduchu

ρ_k - hustota kapaliny (předpokládá se konstantní)

Hustota vzduchu se počítá ze stavové rovnice:

$$\rho_v = \frac{p_{ref} + p}{r \cdot T_{ref}} \quad (2.11)$$

kde: r - měrná plynová konstanta pro vzduch

T_{ref} - statická hodnota teploty (předpokládá se konstantní)

Jedná-li se o stlačitelné médium, je objemový zlomek fáze ovlivňován tlakem [1]:

$$\alpha_{vp} = \alpha_v \left(\frac{p_{ref}}{p_{ref} + p} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.12)$$

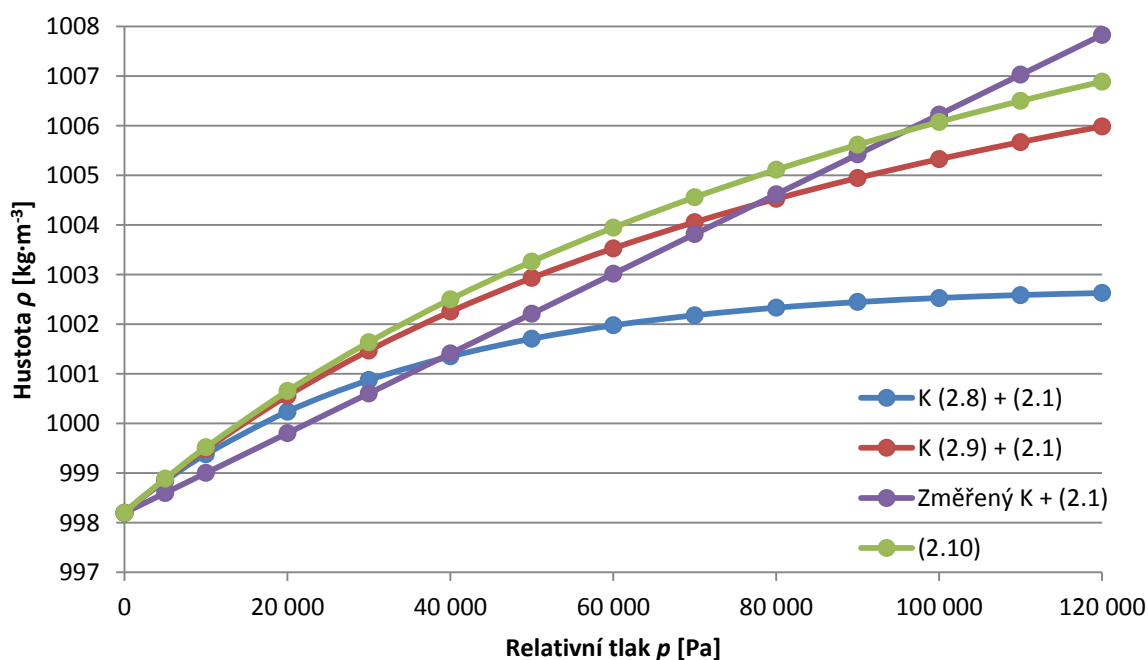
kde: α_{vp} - objemový zlomek vzduchu při tlaku p

p_{ref} - 101 325 [Pa]

p - relativní tlak

Pro porovnání jsou na obr. 2.1 vykresleny průběhy hustot v závislosti na tlaku počítané z různých vzorců. Jako kapalina pro toto porovnání byla zvolena voda. Porovnány byly 4 varianty:

- 1) Modul pružnosti kapaliny počítaný z rovnice (2.8) a dosazený do rovnice (2.1)
- 2) Modul pružnosti kapaliny počítaný z rovnice (2.9) a dosazený do rovnice (2.1)
- 3) Modul pružnosti vypočtený z měření rázu a dosazený do rovnice (2.1)
- 4) Hustota počítána pomocí rovnice (2.10)



obr. 2.1 Porovnání průběhu hustoty počítané pomocí různých vzorců v závislosti na tlaku

Pro modelování proudění v hydraulických obvodech a systémech (při jednorozměrném proudění) se používá homogenní směs kapaliny a vzduchu. Naopak pro detailnější modelování proudění kapaliny v hydraulických prvcích je vhodnější použít nehomogenní směs kapaliny a vzduchu [1].

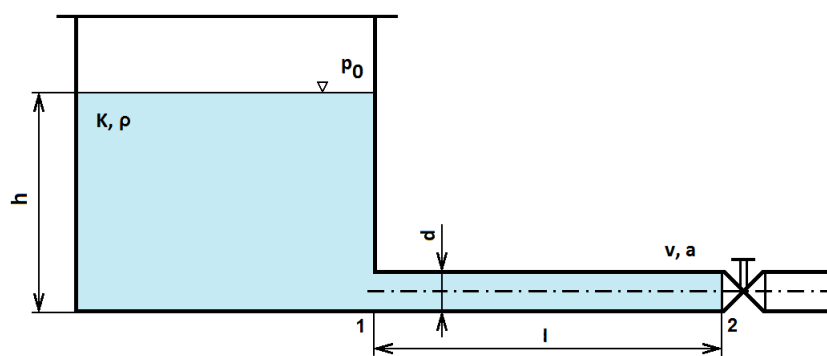
3. Teorie o hydraulickém rázu

Hydraulický ráz patří mezi nejčastější případy nestacionárního izotermního proudění stlačitelné tekutiny. Nestacionární proudění tekutiny v hydraulických prvcích, potrubí a v technické praxi se nejčastěji řeší jako jednorozměrné potrubí. V takových případech je nejjednodušší použít Bernoulliho rovnici pro neustálené nestlačitelné proudění. Tato rovnice také obsahuje člen ve tvaru $a \cdot l$, který bere v potaz setrvačnost kapaliny.

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot h + g \cdot h_z + a \cdot l = konst. \quad (3.1)$$

Při odvozování této rovnice se však neuvažovala stlačitelnost kapaliny, jde tedy o závažný problém a výsledky úloh řešené tímto způsobem jsou platné jen pro malá zrychlení sloupce kapaliny [1].

Při uvažování stlačitelnosti kapaliny je nutné užít postup používaný při řešení hydraulického rázu v jednoduchém horizontálním potrubí. Tedy bude-li se rovnat kinetická energie sloupce proudící kapaliny a deformační práce, dostaneme po úpravách zvýšení tlaku na konci potrubí. Prvotní odvození počítá s tím, že dojde k okamžitému zavření uzavírací armatury na konci potrubí (obr. 3.1, bod 2).



obr. 3.1 Schéma potrubního systému pro určení základních vztahů neustáleného proudění

Zvýšení tlaku plyne z rovnice (platí pro tzv. totální hydraulický ráz):

$$\Delta p = \rho \cdot a_s \cdot v \quad (3.2)$$

Pomocí **Žukovského rovnice** (také Rankin-Hugoniotova) (3.2) lze sice zjistit zvýšení tlaku, nedokáže ale poskytnout údaje o časovém průběhu tlaku na konci potrubí. Rovnicí také nelze stanovit tlak v jiném místě potrubí než na jeho konci [1].

Totální hydraulický ráz bere v úvahu změnu tlaku na konci potrubí, pokud se uzavírací armatura uzavře ihned nebo v čase kratším, než je doba běhu vlny od ventilu k nádrži a zpět. Doba běhu vlny se určí jako:

$$T = \frac{2 \cdot l}{a_s} \quad (3.3)$$

Kapalinu v hydraulických prvcích uvažujeme nestlačitelnou a izotermní. Vliv stlačitelnosti kapaliny a poddajnosti potrubí je obsažen ve členu a_s v rovnici (3.2). Skutečná rychlost zvuku se v hydraulickém systému udává pomocí teoretické rychlosti zvuku a_t a koeficientu κ , jenž respektuje poddajnost potrubí [1].

$$a_t = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (3.4)$$

$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d}{s} \cdot \frac{K}{E}}} \quad (3.5)$$

kde: d - vnitřní průměr potrubí
 s - tloušťka stěny
 K - modul pružnosti kapaliny
 E - modul pružnosti stěny

Skutečná rychlost zvuku je tedy dána vztahem:

$$a_s = \kappa \cdot a_t \quad (3.6)$$

4. Použité metody zkoumání

Hydraulický obvod je složen z hydraulických prvků a potrubí. Každý z těchto prvků je popsán matematickým modelem. Skládají se stejně jako prvky elektrických obvodů, očíslovají se proměnné veličiny (tlak, rychlost, průtok).

Ke zkoumání dynamických vlastností soustavy slouží simulace, kterou lze zjistit časové průběhy požadovaných veličin. Pro simulaci se vytvoří matematický model složený z algebraických, parciálních diferenciálních a obyčejných diferenciálních rovnic. Řešení

modelu se provádí analyticky (exaktně, Laplaceova transformace pro linearizované případy) nebo numericky (analogově nebo číslicově - Eulerova metoda, metoda Runge-Kutta, metoda konečných objemů apod.) [2].

Pro simulaci je možno použít programovací jazyky nebo jiné komerční počítačové programy jako: Matlab, Mathcad, ANSYS Fluent,

Úloha byla nejprve zkoumána experimentálně a následně matematicky pomocí programů Matlab a ANSYS Fluent.

4.1. Experimentální metoda

Aby bylo možné prověřit matematické modely, bylo nutné nejprve provést měření na experimentálním zařízení, konkrétně na obvodu pro měření hydraulického rázu. Kromě samotného měření rázu je nutné, pro správné nastavení simulace, proměřit charakteristiky použitých prvků. Protože se jedná o dynamickou úlohu, byly použity snímače se záznamem do počítače. Problematice rázu se již věnovala má bakalářská práce [3]. Podrobnější popis, včetně schématu obvodu je v kapitole 5.1.

4.2. Jednorozměrná analýza - Matlab - SimHydraulics

Matlab je výpočetní systém používaný pro technické výpočty a simulace v různých odvětvích vědy. Umožňuje rozšíření samotného programu o rozsáhlé specializované knihovny. Největší výhoda Matlabu je rychlé výpočetní jádro s optimálními algoritmy, které se léta používají na specializovaných pracovištích.

SimHydraulics rozšiřuje simulační schopnosti Simulinku o možnost modelování a simulace hydraulických systémů. Umožňuje modelovat systémy skládající se z hydraulických a mechanických prvků, tzv. multi-domain systémy. Používá přitom přímé analogie se skutečnými prvky systému (bloky v SimHydraulics tedy odpovídají reálným prvkům v obvodu). Knihovna programu obsahuje několik desítek prvků (hydrogenerátory, hydromotory, potrubí). Je zde také možnost jejich kombinace za účelem vytvoření vlastního prvku, který se pak parametrizuje. Propojením bloků do sítě vznikne model, který je dosti podobný hydraulickému schématu. Každé jednotlivé spojení mezi bloky v Matlabu odpovídá přenosu energie, tak jako ve skutečném systému. Díky tomu lze simulovat systémy popisem jejich fyzické struktury a nemusí se odvozovat matematické vztahy mezi kontrolovanými veličinami [1] [2].

4.2.1. Elektrohydraulická analogie

Díky elektrohydraulické analogii lze zkoumat hydraulické prvky a systémy za pomoci elektrických obvodů, které mají podobné přechodové vlastnosti. Musí být splněny následující podmínky [2]:

- 1) Zapojení prvků v elektrickém obvodu se odvodí ze zapojení pneumatických a hydraulických prvků v tekutinovém systému.
- 2) Analogické elektrické veličiny se určí ze známých fyzikálních veličin v tekutinovém systému.

Nejčastěji se používá analogie:

- Elektrické napětí U - Tlak p
- Elektrický proud I - Průtok Q

Na základě výše uvedeného se definují tyto odpory [2]:

- **Hydraulický odpor proti pohybu** (reprezentuje třecí a místní odpory):

$$R = \frac{d(\Delta p)}{dQ} \rightarrow d(\Delta p) = R \cdot dQ \quad (4.1)$$

- **Hydraulický odpor proti zrychlení** (indukčnost):

$$L = \frac{\Delta p}{\frac{dQ}{dt}} \rightarrow \Delta p = L \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (4.2)$$

- **Hydraulický odpor proti deformaci:**

$$D = \frac{\frac{d(\Delta p)}{dt}}{Q} = \frac{d(\Delta p)}{d\Delta V} \quad (4.3)$$

- **Hydraulická kapacita** (je převrácenou hodnotou hydraulického odporu proti deformaci)

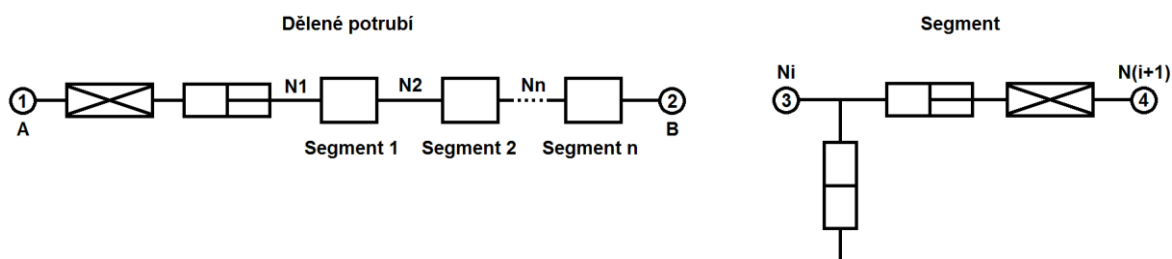
$$C = \frac{Q}{\frac{d(\Delta p)}{dt}} \rightarrow Q = C \cdot \frac{d(\Delta p)}{dt} \rightarrow \Delta p = \frac{1}{C} \int Q dt \quad (4.4)$$

Řazení odporu (sériové, paralelní) je v tekutinových systémech stejné jako v systémech elektrických. U kombinovaného řazení se jedná o odporovou síť, jejíž řešení popisuje zákon o uzlech a zákon o okruzích. Problém nastává v analogii elektromotoru a

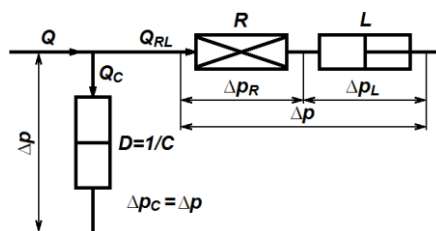
hydrogenerátoru. Elektromotor pracuje při konstantním napětí U a mění se proud I , ale hydrogenerátor pracuje při konstantním Q a mění se tlak p . Je zde tedy nepřímá analogie $U - Q$ a $I - p$. To způsobí, že paralelnímu řazení odporů v tekutinovém obvodu odpovídá sériové řazení odporů v elektrickém obvodu [2].

4.2.2. Segmentové potrubí

Pro vedení pracovního média v systému se používá dělené (segmentové) potrubí. Prvek představuje potrubí kruhového průřezu rozdělené příčnými řezy na stejné, sériově zapojené díly. Každý díl je složen z odporové trubky, bloku setrvačnosti kapaliny a stlačitelnosti kapaliny. Segmentové potrubí je tedy složeno ze sériově a paralelně zapojených odporů. V případě jednoho segmentu se jedná o symetrický T-článek. Další segmenty už jsou uvažovány jako L-članky [1].



obr. 4.1 Skladba děleného potrubí a segmentu



obr. 4.2 L-článek

Řešení pro C+(R-L) - L-článek [2]:

Pro sériově - paralelní řazení odporů vyplývá ze zákona o okruzích podle obr. 4.2:

$$\Delta p = \Delta p_R + \Delta p_L = \Delta p_C \quad (4.5)$$

Ze zákona o uzlech pak plyne:

$$Q = Q_{RL} + Q_C \quad (4.6)$$

Dále potom:

$$Q_{RL} = \frac{1}{L} \int \Delta p_L dt \quad (4.7)$$

$$Q_C = C \frac{d\Delta p}{dt} \quad (4.8)$$

- Lineární nebo linearizované proudění [2]:

$$Q_{RL} = \frac{\Delta p_R}{R_{lin}} \quad (4.9)$$

$$Q = C \frac{d\Delta p}{dt} + \frac{\Delta p_R}{R_{lin}} \rightarrow \Delta p_R = R_{lin} Q - R_{lin} C \frac{d\Delta p}{dt} \quad (4.10)$$

$$Q = C \frac{d\Delta p}{dt} + \frac{1}{L} \int \Delta p_L dt \rightarrow \frac{dQ}{dt} = C \frac{d^2 \Delta p}{dt^2} + \frac{\Delta p_L}{L} \rightarrow \Delta p_L = L \frac{dQ}{dt} - LC \frac{d^2 \Delta p}{dt^2} \quad (4.11)$$

Po úpravě vznikne diferenciální rovnice:

$$LC \frac{d^2 \Delta p}{dt^2} + R_{lin} C \frac{d\Delta p}{dt} + \Delta p = L \frac{dQ}{dt} + R_{lin} Q \quad (4.12)$$

- Turbulentní proudění [2]:

$$Q_{RL} = \sqrt{\frac{\Delta p_R}{R}} \quad (4.13)$$

$$Q = C \frac{d\Delta p}{dt} + \sqrt{\frac{\Delta p_R}{R}} \rightarrow \Delta p_R = R \left(Q - C \frac{d\Delta p}{dt} \right)^2 \quad (4.14)$$

$$Q = C \frac{d\Delta p}{dt} + \frac{1}{L} \int \Delta p_L dt \rightarrow \frac{dQ}{dt} = C \frac{d^2 \Delta p}{dt^2} + \frac{\Delta p_L}{L} \rightarrow \Delta p_L = L \frac{dQ}{dt} - LC \frac{d^2 \Delta p}{dt^2} \quad (4.15)$$

Po úpravě vznikne diferenciální rovnice:

$$LC \frac{d^2 \Delta p}{dt^2} + 2RCQ \frac{d\Delta p}{dt} - RC^2 \left(\frac{d\Delta p}{dt} \right)^2 + \Delta p = L \frac{dQ}{dt} + RQ^2 \quad (4.16)$$

Diferenciální rovnice (4.12) a (4.16) vyjadřují závislost průtoku Q na tlakovém spádu. Jelikož jsou obě veličiny v derivacích, lze jako vstupní veličinu zvolit libovolnou proměnnou a druhou veličinu pak spolu se zadanými počátečními podmínkami řešit [2].

4.3. Vícerozměrná analýza - ANSYS Fluent

Software ANSYS Fluent je součástí programového prostředí ANSYS Workbench, který mimo jiné obsahuje programy jako DesignModeler a ANSYS Meshing. DesignModeler slouží k vytváření geometrie nebo k modifikaci již vytvořené geometrie z jiného CAD systému. ANSYS Meshing umožňuje vytvoření výpočetní sítě s následnou možností úprav její kvality.

Samotný program ANSYS Fluent umožňuje provést numerickou simulaci od jejího nastavení, přes výpočet, po následné zobrazení výsledků. Fluent umí řešit děje rovinné dvourozměrné, osově symetrické, obecně trojrozměrné a časově závislé, které jsou popsány parciálními diferenciálními rovnicemi. Důležité je vybrat správný matematický model proudění, např. jednofázové nebo vícefázové, s příměsí nebo bez nich. Dále se nastavují fyzikální vlastnosti použitých medií, počáteční a okrajové podmínky. Poté následuje numerický výpočet a vyhodnocení výsledků [4].

4.3.1. Porézní prostředí

Jedná se o proudění přes různé pórovité nebo perforované materiály jako jsou textilní vrstvy, děrované plechy, rošty, filtry atd. Tuto funkci lze použít i v programu ANSYS Fluent. Výhodou je zjednodušení modelované geometrie. Nemusí se tedy vytvořit detailní model součásti, ale poréznost se nastaví na zjednodušeném modelu (na zvolené ploše nebo objemu). Odpor proti proudění na porézní vrstvě se určuje experimentálně. Ve Fluentu se tato funkce nazývá "Porous Jump" a lze ji použít pro porézní materiál, u kterého je známá tlaková ztráta [10].

Porézní tenkostěnné médium o konečné tloušťce představuje ztrátu tlaku danou Darcyho vztahem a přidanou inertní ztrátou:

$$\Delta p = - \left(\frac{\eta}{\alpha} \cdot v + C_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \right) t \quad (4.17)$$

kde: η - dynamická viskozita
 α - propustnost porézní vrstvy
 v - rychlost kolmá k porézní vrstvě
 C_2 - koeficient změny tlaku
 ρ - hustota proudícího média
 t - tloušťka vrstvy

4.3.2. Časově závislé řešení

Při časově závislém proudění je výchozí bilanční rovnice diskretizována v čase a prostoru. "Prostorová diskretizace pro časově závislé rovnice je shodná se stacionární úlohou. Časová diskretizace zahrnuje integraci každého členu diferenciální rovnice s časovým krokem Δt " [11]. Rovnice v obecné podobě má tvar:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = F(\zeta) \quad (4.18)$$

kde funkce F obsahuje prostorovou diskretizaci. Při použití diferenční aproximace prvního řádu na časovou derivaci, je možno získat diskretizovanou rovnici:

$$\frac{\zeta^{n+1} - \zeta^n}{\Delta t} = F(\zeta) \quad (4.19)$$

a diskretizace druhého řádu má tvar:

$$\frac{3\zeta^{n+1} - 4\zeta^n + \zeta^{n-1}}{\Delta t} = F(\zeta) \quad (4.20)$$

kde: ζ - obecná skalární veličina

$n+1$ - hodnota v následném čase $t + \Delta t$

n - hodnota v čase t

$n-1$ - hodnota v předchozím čase $t - \Delta t$

Pro určitý časový krok jsou v iteračním schématu všechny rovnice řešeny iteračně, dokud se nedosáhne konvergence. Pro zkonvergování v každém časovém kroku je nutný určitý počet vnějších iterací v každém časovém kroku.

Zvolit správný časový krok není jednoduché. Jestliže je časová závislost způsobena známou okrajovou podmínkou, pak lze časový krok přibližně odhadnout. Pokud toto není splněno, musí se velikost časového kroku na začátku výpočtu testovat a splnit tyto podmínky [11]:

- v každém časovém kroku je doporučený počet vnějších iterací 10-20
- větší počet iterací = velký časový krok, menší počet iterací = malý časový krok
- na začátek výpočtu zvolit malý časový krok Δt a ten postupně zvyšovat

Fluent umožňuje automatické ukládání datových souborů pomocí příkazu "Write"/"Autosave" v záložce "File". Zde lze nastavit po kolika časových krocích má dojít k uložení. Dále lze ukládat průběhy zvolených proměnných v závislosti na čase v konkrétním místě oblasti. Tyto místa se nazývají monitorovací body. Lze je vytvořit v nabídce "Solution"/"Monitors"/"Surface Monitors". Je třeba vybrat sledované místo a požadovanou proměnnou. Tyto záznamy lze během výpočtu zobrazit v grafu nebo je ukládat do souboru [11].

Časově závislé okrajové podmínky lze zadat dvěma způsoby:

- 1) Pomocí souboru (tabulky) pro definici profilu - Tabulka se vytvoří v textovém dokumentu s příponou txt.
- 2) UDF (User Defined Function) - funkce se vytvoří v C jazyku, proměnné je nutné definovat podle manuálu.

5. Měření

Na obvodu pro měření hydraulického rázu byla změřena nejprve charakteristika hydrodynamického čerpadla a charakteristika clony. Charakteristika kulového kohoutu byla převzata z literatury [8]. Tyto charakteristiky byly nutné pro následný výpočet potřebných koeficientů a ztrátových součinitelů, které se zadávají do matematické simulace. Následně byl změřen hydraulický ráz pro porovnání s matematickým modelem. Obvod lze považovat za nízkotlaký systém. Výška hladiny v nádrži od osy potrubí byla u všech měření 0,25 m.

5.1. Popis obvodu

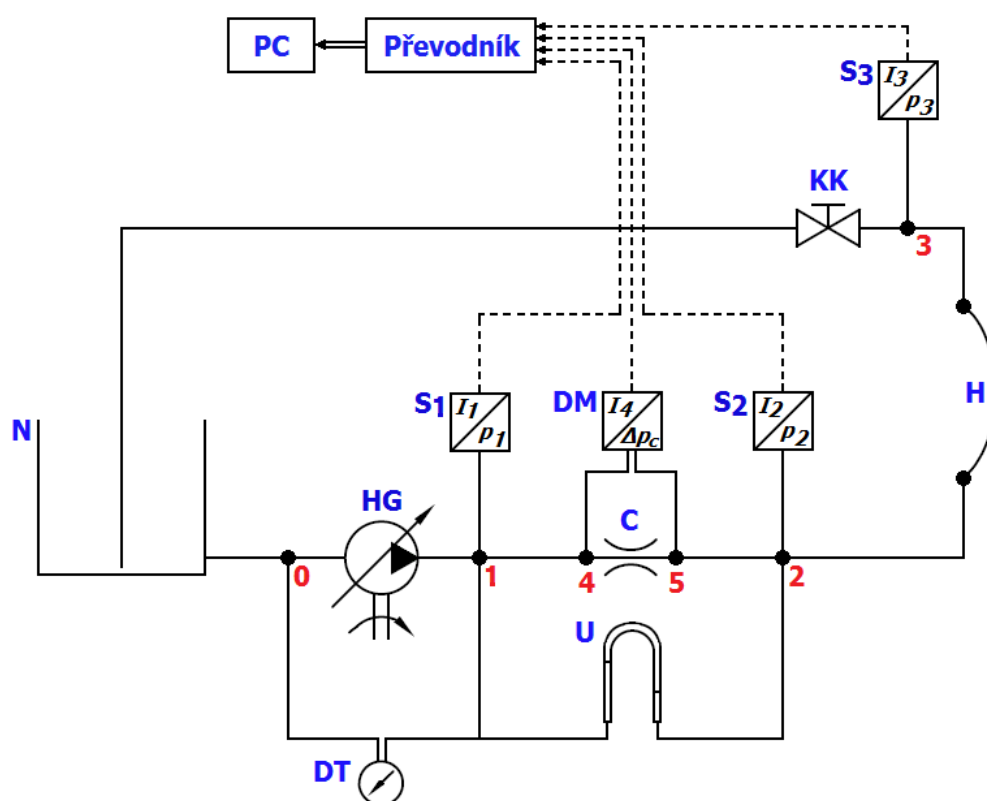
Obvod (obr. 5.1 a obr. 5.2) je složen z prvků: nádrž na vodu (N), čerpadlo (HG), digitální tlakoměr (DT), clona (C), diferenční manometr pro měření průtoku (DM), obrácená U-trubice (U), kulový kohout (KK), hadice (H), tři elektrické snímače tlaku S_1 , S_2 a S_3 (připojené k odběrným místům 1, 2 a 3) a spojovací prvky potrubí. Specifikace jednotlivých prvků viz Příloha A.

Měření bylo provedeno při těchto referenčních podmínkách:

Referenční teplota	T_{ref}	20	[°C]
Referenční tlak	p_{ref}	101 325	[Pa]

Ize tedy uvažovat následující vlastnosti kapaliny (vody):

Referenční hustota	$\rho_{ref(20^{\circ}C)}$	998,2	[kg·m ⁻³]
Dynamická viskozita	$\eta_{(20^{\circ}C)}$	0,001003	[Pa·s]
Kinematická viskozita	$\nu_{(20^{\circ}C)}$	$1 \cdot 10^{-6}$	[m ² ·s ⁻¹]



obr. 5.1 Schéma obvodu

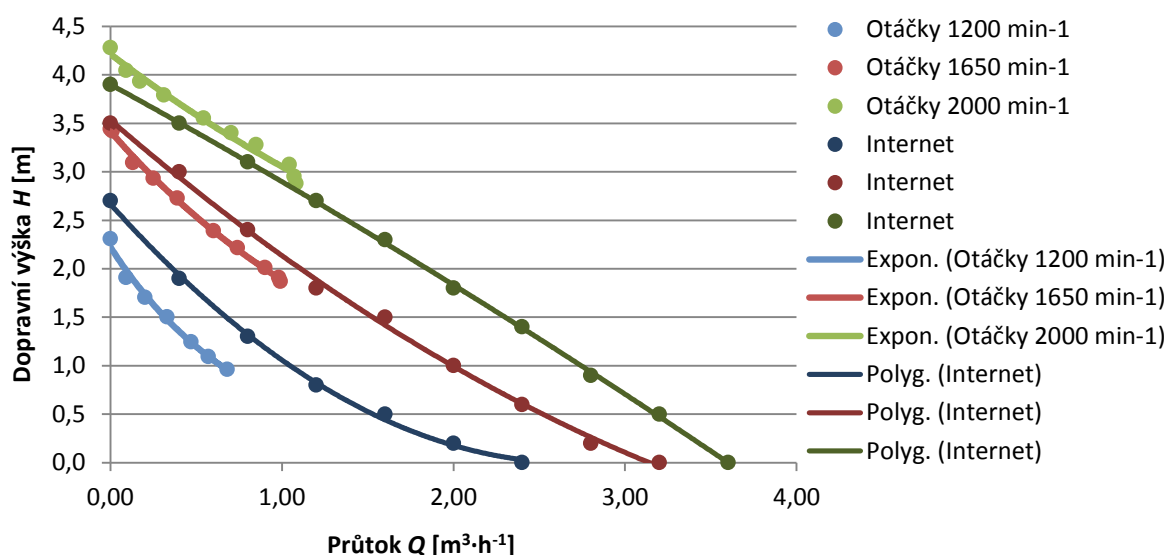


obr. 5.2 Obvod pro měření hydraulického rázu

5.2. Charakteristika čerpadla

Čerpadlo (HG) umožňuje regulaci průtoku pomocí otáček, které lze měnit přímo na tělese čerpadla. Charakteristika byla změřena pro všechny tři možné velikosti otáček, tedy: 1200, 1650 a 2000 min^{-1} . Průtok kapaliny (vody) byl plynule regulován pomocí kulového kohoutu KK a jeho velikost byla měřena diferenčním manometrem DM, který umožňuje záznam do počítače. DM byl připojen k odběrným místům 4 a 5. Diferenční tlak byl měřen pomocí digitálního tlakoměru DT připojeného k odběrným místům před čerpadlem (0) a za čerpadlem (1). Kapalina se vracela zpět do nádrže. V příloze B jsou zobrazeny naměřené a vypočtené hodnoty.

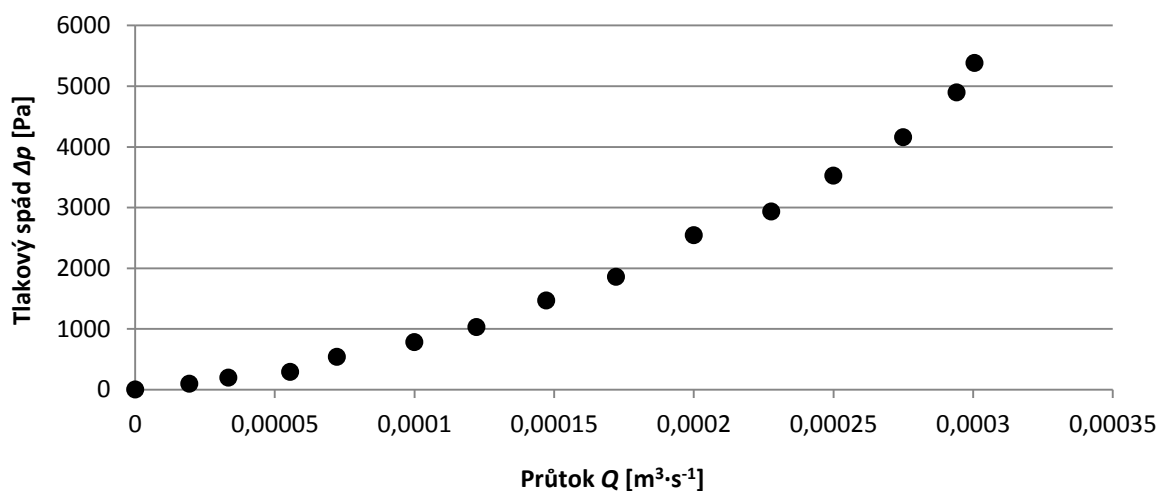
Naměřená charakteristika pro hydrodynamické čerpadlo WILO RS 25/4 byla porovnána s charakteristikou dostupnou na internetu [7] (obr. 5.3).



obr. 5.3 Naměřená charakteristika čerpadla v porovnání s internetem

5.3. Charakteristika clony

Ztrátová výška na cloně (C) byla měřena obrácenou U-trubicí (U), která byla připojená k odběrným místům 1 a 2, následně se z ní vypočítal tlakový spád. Průtok byl opět škrcen kulovým kohoutem (KK), měřen diferenčním manometrem DM (odběrná místa 4 a 5) a zaznamenáván do počítače pomocí programu LabView. Kapalina se vracela zpět do nádrže. V příloze C jsou zobrazeny naměřené a vypočtené hodnoty, ze kterých byla vykreslena charakteristika clony (obr. 5.4) a je zde přiložena také cejchovní křivka. Detailní výpočet ztrátového součinitele ζ a průtokového součinitele μ je v příloze D.



obr. 5.4 Charakteristika clony

Vypočtené hodnoty:

- Plocha průtočného průřezu:

$$S = 0,00012272 \text{ [m}^2\text{]}$$

- Ztrátový součinitel:

$$\zeta = 1,749\,780 \text{ [1]}$$

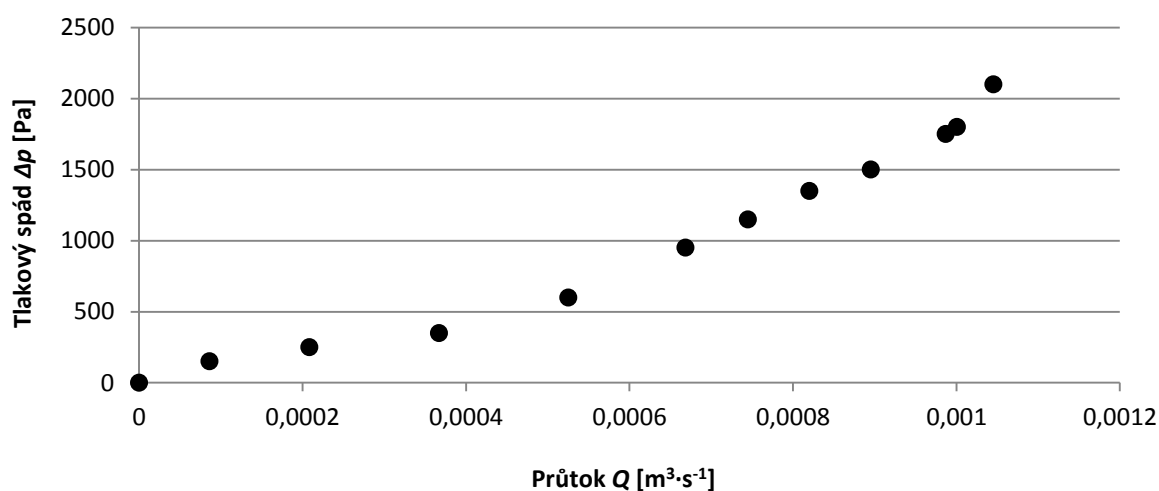
- Průtokový součinitel:

$$\mu = 0,755\,977 \text{ [1]}$$

5.4. Charakteristika kulového kohoutu

Měření charakteristiky kulového kohoutu (KK) bylo detailně provedeno v rámci bakalářské práce studentky Miroslavy Horáčkové [8]. Z této práce byla převzata charakteristika kulového kohoutu při plném otevření, jelikož při hydraulickém rázu je kohout používán jako otevřený nebo uzavřený. Protože doba jeho přestavení z otevřené polohy do uzavřené je velmi krátká (desetiny sekundy), zjednodušeně se předpokládá lineární změna průtočné plochy při zavírání.

V příloze E jsou zobrazeny naměřené a vypočtené hodnoty, ze kterých byla vykreslena charakteristika kulového kohoutu (obr. 5.5). Detailní výpočet ztrátového součinitele ζ a průtokového součinitele μ je v příloze F.



obr. 5.5 Charakteristika kulového kohoutu

Vypočtené hodnoty:

- Plocha průtočného průřezu:

$$S = 0,000491 \text{ [m}^2\text{]}$$

- Ztrátový součinitel:

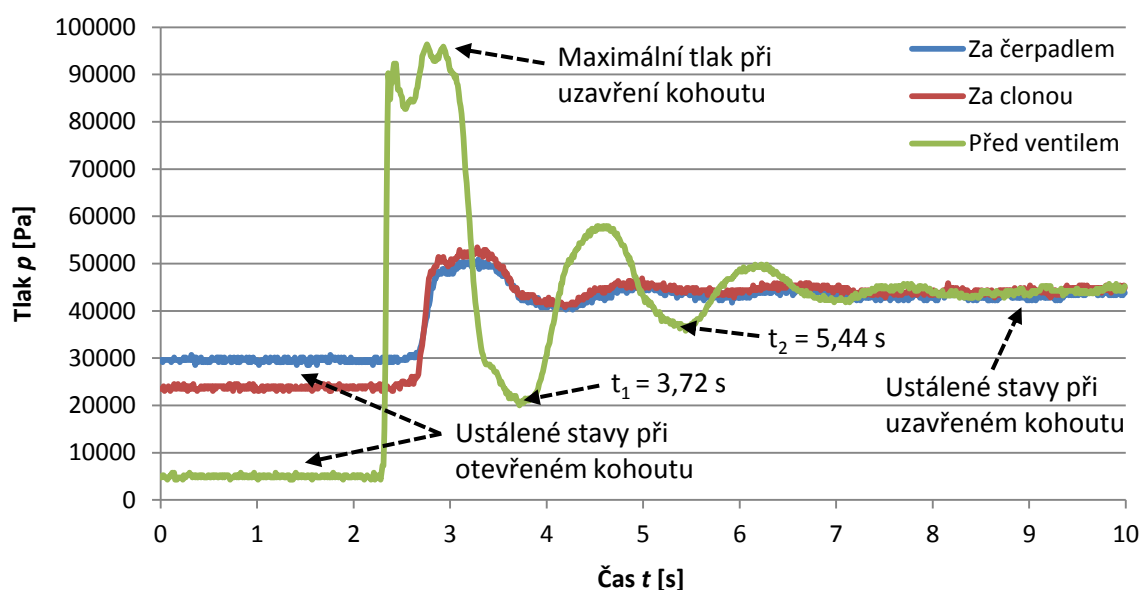
$$\zeta = 0,916\,810 \text{ [1]}$$

- Průtokový součinitel:

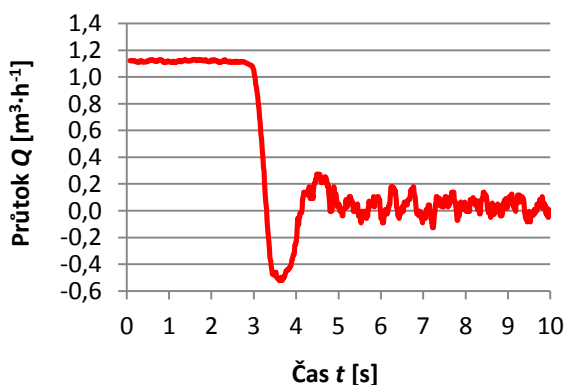
$$\mu = 1,044\,384 \text{ [1]}$$

5.5. Měření hydraulického rázu

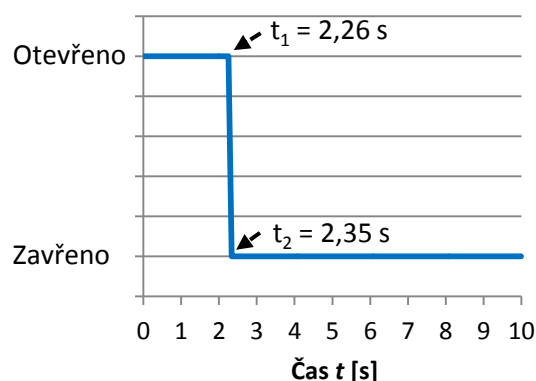
Voda byla z nádrže (N) nasávána pomocí čerpadla (HG). Za čerpadlem byl umístěn první elektrický snímač tlaku (S_1). Dalším prvkem byla clona (C), na které byl umístěn diferenční manometr (DM). Ten snímal tlakový spád a v počítači ho přepočítával na průtok. Druhý elektrický snímač tlaku (S_2) byl umístěn za clonou. Následovala 48 m dlouhá hadice (H) na jejímž konci byl umístěn kulový kohout (KK), jehož rychlým uzavřením vznikl hydraulický ráz. Na kohoutu byly umístěny snímače, které snímaly jeho polohu (zavřeno - otevřeno). Před kulovým kohoutem byl umístěn třetí elektrický tlakový snímač (S_3). Voda se vracela zpět do nádrže. Signál z elektrických snímačů tlaku, diferenčního manometru a snímačů polohy ventilu byl pomocí analogově-digitálního převodníku převeden do počítače (PC), kde byl zpracován pomocí programu LabView. Další zpracování výsledku už probíhalo v programu MS Excel (obr. 5.6, obr. 5.7 a obr. 5.8). Délka záznamu měření byla v programu LabView nastavena na 10 s.



obr. 5.6 Naměřený průběh tlaků při hydraulickém rázu (uzavírání armatury)



obr. 5.7 Průběh průtoku (experiment)



obr. 5.8 Průběh polohy ventilu (experiment)

Podle metodiky popsané v mé bakalářské práci [3], byl proveden výpočet hydraulického rázu pro otáčky čerpadla $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ při rychlém uzavírání kulového kohoutu.

Výpočet základních parametrů hydraulického rázu pro $n = 2000 \text{ min}^{-1}$.

1) Perioda vlny

$$t_p = t_2 - t_1 = 5,44 - 3,72 = 1,72 \text{ [s]}$$

2) Doba běhu vlny

$$T = \frac{t_p}{2} = \frac{1,72}{2} = 0,86 \text{ [s]}$$

3) Frekvence běhu vlny

$$f = \frac{1}{t_p} = \frac{1}{1,72} = 0,58 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

4) Rychlost šíření vlny

$$a_s = \frac{2 \cdot l}{T} = \frac{2 \cdot 48}{0,86} = 111,63 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

5) Rychlost proudění v potrubí

$$Q = 1,12 \text{ [m}^3 \cdot \text{h}^{-1}\text{]} \cong 0,000311 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

$$Q = S \cdot v \rightarrow v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{0,000311}{\frac{\pi \cdot 0,025^2}{4}} = 0,634 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

6) Diference rychlostí

$$\Delta v = v - v_0 = 0,634 - 0 = 0,634 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

7) Nárůst tlaku při hydraulickém rázu

$$\Delta p = \rho \cdot a_s \cdot \Delta v = 998,2 \cdot 111,63 \cdot 0,634 = 70\,605 \text{ [Pa]}$$

8) Modul pružnosti kapaliny

$$a_s = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \rightarrow K = a_s^2 \cdot \rho = 111,63^2 \cdot 998,2 = 12\,438\,360 \text{ [Pa]}$$

6. Simulace

6.1. Matlab - SimHydraulics

Simulační model v programu Matlab byl vytvořen tak, aby co nejpřesněji odpovídal skutečnému hydraulickému obvodu a fyzikálnímu experimentu - hydraulickému rázu. Byly zde použity hydraulické a obecné prvky z knihoven SimHydraulics, Simulink a Simscape. Simulace byla provedena pro nejvyšší otáčky čerpadla ($n = 2000 \text{ min}^{-1}$). Byly simulovány a následně porovnány dvě varianty:

- 1) Vypočtený modul pružnosti z měření rázu a nulový obsah vzduchu
- 2) Teoretický modul pružnosti [9] a objemový zlomek vzduchu $\alpha = 0,02$

	Varianta 1	Varianta 2	
Hustota	998,2	998,2	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
Kinematická viskozita	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
Modul pružnosti	z měření rázu	$2 \cdot 10^9$	$[\text{Pa}]$
Relativní množství obsaženého vzduchu	$1 \cdot 10^{-12}$	0,02	[1]

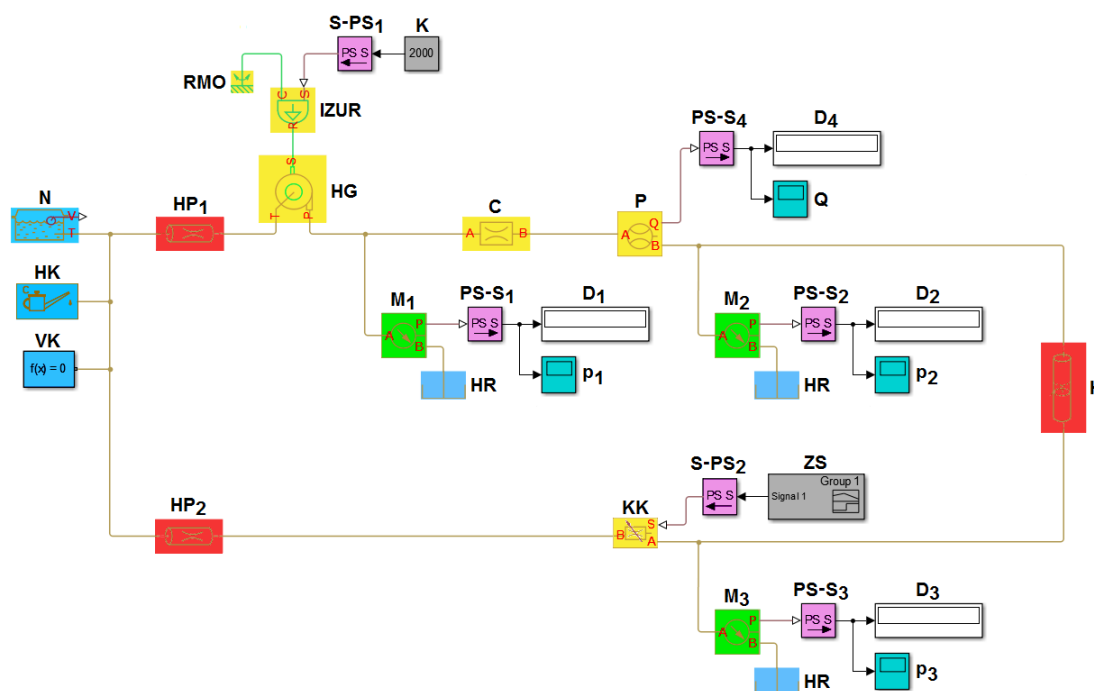
6.1.1. Schéma obvodu

Nejprve bylo nutné provést základní nastavení simulačního modelu. K tomuto nastavení se lze dostat přes záložku "Simulation"/"Model Configuration Parameters". Důležité je zvolit řešitele, který bude Matlab při výpočtech používat. Pro tento případ byl zvolen "ode15s (stiff/NDF)". Dále je potřeba nastavit dobu trvání simulace. Ta byla ve shodě s experimentem nastavena na 10 s.

Zdrojem tlakové energie v obvodu pro simulaci bylo odstředivé čerpadlo HG. Otáčky čerpadla se nastavily na konstantní hodnotu blokem K a přes převodník S-PS₁ a ideální zdroj úhlové rychlosti IZUR byly převedeny na úhlovou rychlost. Dále následuje prvek clona C, kterou byl při experimentu měřen průtok. Tento prvek ale vytváří v obvodu tlakovou ztrátu, kterou je nutné zohlednit v simulaci. Za clonou je umístěn průtokoměr P, protože samotnou clonou nelze v simulaci průtok měřit. Následujícím prvkem je segmentované potrubí H, které reprezentuje 48 m dlouhou hadici. Za tímto potrubím je umístěn kulový kohout KK, kterým bylo uzavíráno potrubí a tím byl vyvolán hydraulický ráz. Uzavírání kohoutu je realizováno přes zdroj signálu ZS, který je ke kohoutu připojen. Hydraulickým potrubím HP₁ je kapalina čerpána z nádrže a potrubím HP₂ se vrací zpět do nádrže.

V obvodu jsou také umístěny tři tlakové snímače, kterými byly měřeny tlaky za čerpadlem (snímač M_1), za clonou (M_2) a před ventilem (M_3). Hodnoty ze snímačů tlaků a průtoku lze pomocí převodníku zobrazit buď jako grafický výstup přes prvky p_1 , p_2 , p_3 , Q nebo jako digitální textový výstup.

Další důležité prvky, které je nutné do obvodu zapojit jsou nádrž N (kde lze nastavit základní parametry nádrže) a hydraulická kapalina HK (kde se nastaví vlastnosti použité kapaliny). Posledním prvkem je výpočtová konfigurace VK , kde lze měnit určité parametry pro výpočet. Schéma celého obvodu je na obr. 6.1.



obr. 6.1 Schéma simulačního obvodu v Matlabu

Zkratka:	Prvek:	Původní název bloku:
C	Clona	"Constant Area Hydraulic Orifice"
D	Displej	"Display"
H	Hadice	"Segmented Pipeline"
HG	Hydrogenerátor	"Centrifugal Pump"
HK	Hydraulická kapalina	"Custom Hydraulic Fluid"
HP ₁ , HP ₂	Hydraulické potrubí	"Hydraulic Resistive Tube"
HR	Hydraulická reference	"Hydraulic Reference"
IZUR	Ideální zdroj úhlové rychlosti	"Ideal Angular Velocity Source"
K	Konstanta	"Constant"
KK	Kulový kohout	"Variable Orifice"
M	Manometr	"Ideal Hydraulic Pressure Sensor"

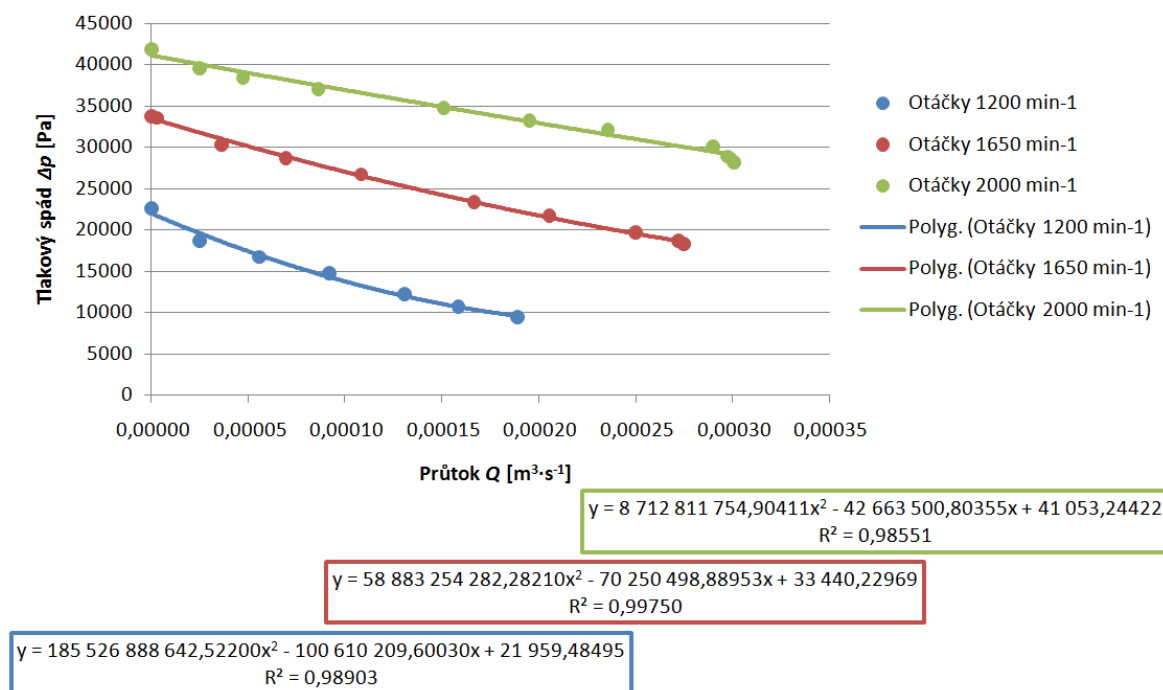
RMO	Reference mechanického otáčení	"Mechanical Rotational Reference"
N	Nádrž	"Constant Head Tank"
P	Průtokoměr	"Ideal Hydraulic Flow Rate Sensor"
PS-S	PS-S převodník	"PS-Simulink Converter"
p ₁ , p ₂ , p ₃	Graf průběhu tlaků	"Scope"
Q	Graf průběhu průtoku	"Scope"
S-PS	S-PS převodník	"Simulink-PS Converter"
VK	Výpočtová konfigurace	"Solver Configuration"
ZS	Zdroj signálu	"Signal Builder"

6.1.2. Nastavení použitých prvků

V této kapitole jsou popsány nejdůležitější bloky použité v simulaci a jejich nastavení. U použitých bloků jsou sepsány pouze parametry, které byly zvoleny nebo upraveny, ostatní parametry zůstaly přednastaveny. Některé bloky nastavení neumožňují vůbec.

Hydrogenerátor (HG)

Blok hydrogenerátor ("Centrifugal Pump") reprezentuje odstředivé čerpadlo libovolného typu [9]. Parametry lze zadávat různými možnostmi, na základě naměřených dat. Pro tuto simulaci byla zvolena parametrizace polynomicou závislostí tlakového spádu na průtoku. Bylo tedy nutné na základě změřených hodnot charakteristiky čerpadla (kapitola 5.2) vytvořit graf Δp - Q (obr. 6.2).



obr. 6.2 Závislost tlakového spádu na průtoku čerpadla s rovnicemi regrese

Pomocí spojnice trendu (polynomická 2. řádu) byla zobrazena rovnice regrese ve tvaru: $\Delta p = a_2 \cdot Q^2 + a_1 \cdot Q + a_0$. Koeficienty (a_0, a_1, a_2) vzniklé z této rovnice se použily k výpočtu aproximačních koeficientů (c_0, c_1, c_2) , které se používají pro zadávání charakteristiky čerpadla do matematické simulace Matlab SimHydraulics pomocí polynomu [9].

Výpočet pro otáčky čerpadla $n = 2000 \text{ min}^{-1}$:

$$c_0 = \frac{a_0}{\rho_{ref}} + c_3 \cdot Q_D^2 = \frac{8\,712\,811\,754,90411}{998,2} + 0,8 \cdot 0,0002897^2$$

$$c_0 = 41,12727 [\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$c_1 = -\frac{a_1}{\rho_{ref}} + 2 \cdot c_3 \cdot Q_D = -\frac{-42\,663\,500,80355}{998,2} + 2 \cdot 0,8 \cdot 0,0002897$$

$$c_1 = 42\,740,43405 [\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$c_2 = -\frac{a_2}{\rho_{ref}} - c_3 = -\frac{41\,053,24422}{998,2} - 0,8$$

$$c_2 = -8\,728\,523,89648 [\text{Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}]$$

Pro výpočet je nutné určit koeficient c_3 a návrhový průtok Q_D . Koeficient c_3 vychází z rovnice pro měrnou energii čerpadla [9]:

$$Y_S = \frac{Y_{t\infty}}{(1+p)} \cdot \eta_h \quad (6.1)$$

kde: Y_S - skutečná měrná energie čerpadla

$Y_{t\infty}$ - měrná energie čerpadla z Eulerovy rovnice

p - Pfeiderův součinitel (0,2 - 0,3)

η_h - účinnost hydraulická

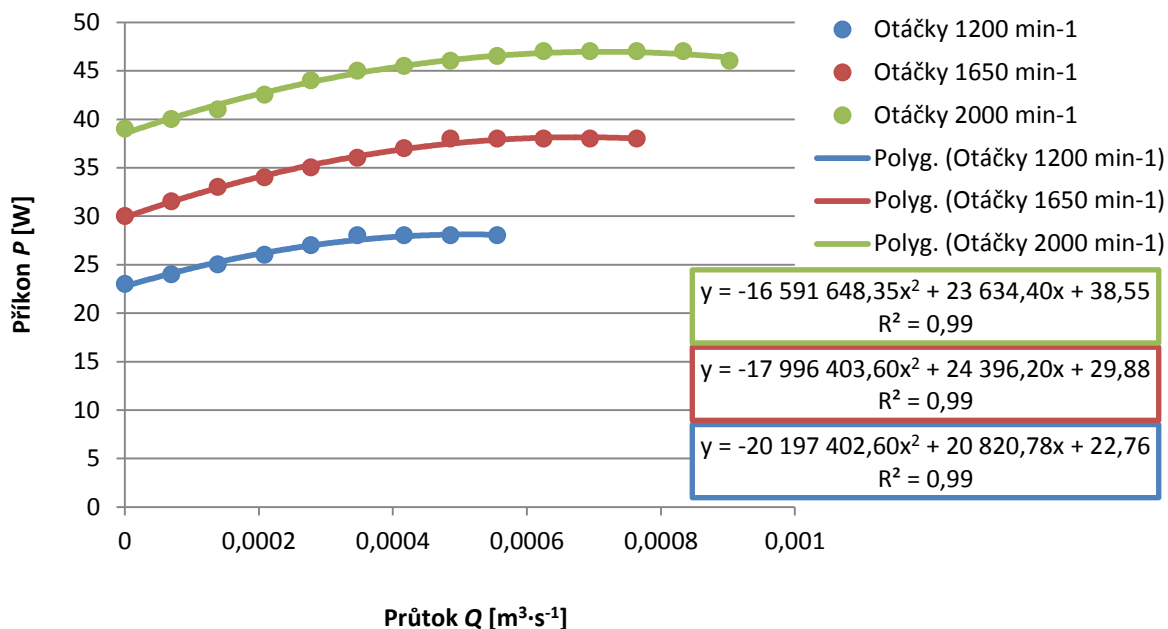
Pokud se zanedbá vliv účinnosti, potom se koeficient c_3 určí jako [9]:

$$c_3 = \frac{Y_S}{Y_{t\infty}} = \frac{1}{(1+p)} \quad (6.2)$$

Byl zvolen Pfeiderův součinitel $p = 0,25$ a tedy:

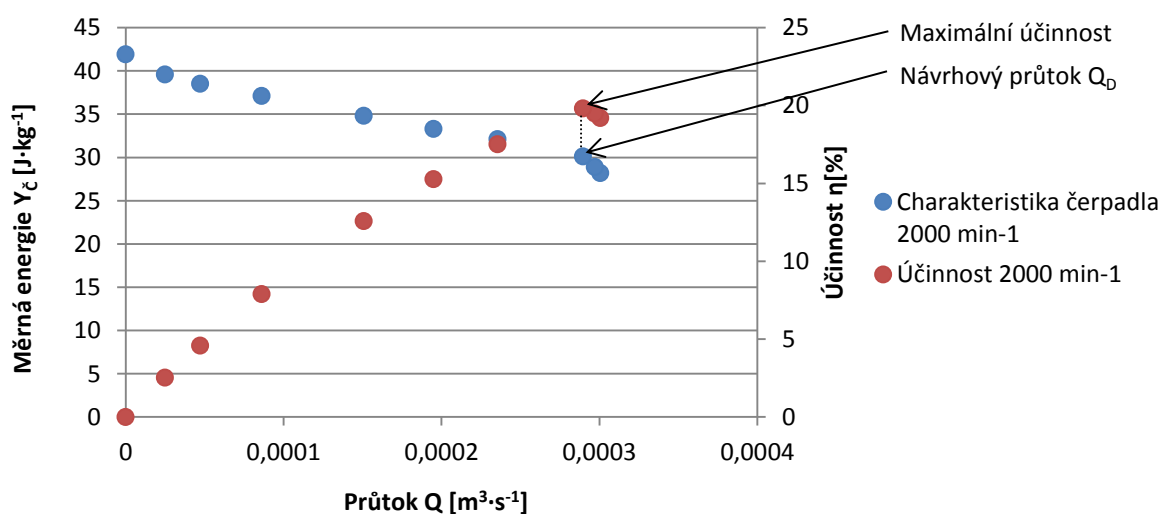
$$c_3 = \frac{1}{(1+p)} = \frac{1}{(1+0,25)} = 0,8 [\text{Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}]$$

Návrhový průtok byl určen pro maximální otáčky (2000 min^{-1}). Z naměřeného průtoku Q a vypočtené měrné energie čerpadla $Y_{\text{č}}$ se potom vypočetl hydraulický výkon $P_h = Q \cdot \rho \cdot Y_{\text{č}}$ (tab. 10.3). Na internetových stránkách výrobce čerpadla [7] byla získána závislost příkonu P na průtoku Q (obr. 6.3).



obr. 6.3 Závislost příkonu na průtoku čerpadla s rovnicemi regrese

Pomocí rovnic regrese byl určen příkon pro naměřené průtoky (tab. 10.3). Byla spočítána účinnost čerpadla $\eta = \frac{P_h}{P}$ a vykreslen graf (obr. 6.4) z něhož vyplývá, že nejvyšší účinnost je 19,82 % pro návrhový průtok $Q_D = 0,0002897 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Obdobným způsobem by se postupovalo při určování hodnot pro jiné otáčky.



obr. 6.4 Charakteristika čerpadla s účinností

Model parameterization	By approximating polynomial		
First approximating coefficient	První aproximační koeficient	41,12727	$[\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
Second approximating coefficient	Druhý aproximační koeficient	42 740,43405	$[\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}]$
Third approximating coefficient	Třetí aproximační koeficient	-8 728 523,89648	$[\text{Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}]$
Fourth approximating coefficient	Čtvrtý aproximační koeficient	0,8	$[\text{Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}]$
Correction factor	Korekční faktor	1	[1]
Pump design delivery	Čerpané množství	0,0002897	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
Reference angular velocity	Referenční úhlová rychlost	2 000	$[\text{min}^{-1}]$
Reference density	Referenční hustota	998,2	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

tab. 6.1 Nastavené parametry pro blok Hydrogenerátor (HG)

Clona (C)

Blok clona ("Constant Area Hydraulic Orifice") definuje průtok otvorem s ostrými hranami [2]. Parametry byly zadány na základě měření charakteristiky clony a následného výpočtu výtokového součinitele (viz kapitola 5.3).

Orifice area	Plocha otvoru	0,00012272	$[\text{m}^2]$
Flow discharge coefficient	Výtokový součinitel	0,755977	[1]

tab. 6.2 Nastavené parametry pro blok Clona (C)

Kulový kohout (KK)

Blok kulový kohout ("Variable Orifice") definuje odpor prvku v závislosti na otevření [9]. Parametry lze zadávat různými možnostmi, na základě naměřených dat. Pro tuto simulaci byla zvolena parametrizace maximální průtočnou plochou a otevřením ("By maximum area and opening"). Hodnoty byly zadány na základě měření charakteristiky kulového kohoutu a následného výpočtu výtokového součinitele (viz kapitola 5.4). Otevírání a zavírání kohoutu je možno řídit pomocí dalšího prvku (v tomto obvodu to bylo provedeno pomocí bloku zdroje signálu - "Signal Builder").

Model parameterization	By maximum area and opening		
Orifice maximum area	Maximální plocha otvoru	0,000491	[m ²]
Orifice maximum opening	Maximální otevření otvoru	1	[m]
Orifice orientation	Opens in positive direction		
Flow discharge coefficient	Výtokový součinitel	1,044384	[1]
Initial opening	Počáteční otevření	0	[m]

tab. 6.3 Nastavené parametry pro blok Kulový kohout (KK)

Hadice (H)

Blok hadice ("Segmented Pipeline") slouží k vedení kapaliny v systému. Jedná se o potrubí kruhového průřezu, které je rozdělené příčnými řezy na stejné, sériově zapojené díly [9]. Každý díl je složen z odporové trubky, bloku setrvačnosti kapaliny a stlačitelnosti kapaliny. Hadice měla průměr 0,025 m, její délka byla 48 m a při experimentu byla stočená do spirály. Toto zakřivení vyvolává místní ztráty způsobené odstředivou silou. S ohledem na tuto skutečnost byla ekvivalentní délka místních ztrát nastavena na 1 m. Drsnost vnitřního povrchu byla odhadnuta. Pro první variantu výpočtu bylo zvoleno 30 segmentů, u druhé varianty byl počet segmentů z důvodů velkého rozkmitání snížen na 5 segmentů.

		Varianta 1	Varianta 2	
Pipe internal diameter	Vnitřní průměr potrubí	0,025	0,025	[m]
Pipe lenght	Délka potrubí	48	48	[m]
Number of segments	Počet segmentů	30	5	[1]
Aggregate equivalent lenght of local resistances	Ekvivalentní délka místních ztrát	1	1	[m]
Internal surface roughness	Drsnost vnitřního povrchu	0,0005	0,0005	[m]

tab. 6.4 Nastavené parametry pro blok Hadice (H)

Nádrž (N)

Blok nádrž ("Constant Head Tank) definuje parametry nádrže jako je objem, výška hladiny nebo tlak v nádrži. Výška hladiny byla zadána stejná jako při experimentu. Nádrž byla otevřená do atmosféry, proto bylo tlakování nastaveno na 0 Pa.

Pressurization	Tlakování	0	[Pa]
Fluid level	Výška hladiny	0,25	[m]
Initial fluid volume	Počáteční objem kapaliny	0,042	[m ³]
Inlet pipeline diameter	Průměr sacího potrubí	0,0232	[m]
Pipeline pressure loss coefficient	Koeficient ztráty tlaku	1	[1]

tab. 6.5 Nastavené parametry pro blok Nádrž (N)

Hydraulická kapalina (HK)

Blok hydraulická kapalina ("Custom Hydraulic Fluid") se používá k zadání vlastností kapaliny proudící v obvodu. V souladu s měřením byly do simulace nastaveny parametry vody při 20°C. Modul pružnosti kapaliny byl v první variantě nastaven na hodnotu získanou z měření hydraulického rázu (viz kapitola 5.5), ve druhé variantě byl zvolen teoretický modul pružnosti vody a obsah vzduchu 2 %.

		Varianta 1	Varianta 2	
Fluid density	Hustota kapaliny	998,2	998,2	[kg·m ⁻³]
Kinematic viscosity	Kinematická viskozita	1·10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁶	[m ² ·s ⁻¹]
Bulk modulus at atm. pressure and no gass	Modul pružnosti	12 438 360	2·10 ⁹	[Pa]
Relative amount of trapped air	Relativní množství obsaženého vzduchu	1·10 ⁻¹²	0,02	[1]

tab. 6.6 Nastavené parametry pro blok Hydraulická kapalina (HK)

Hydraulické potrubí (HP₁, HP₂)

Blok hydraulické potrubí ("Hydraulic Resistive Tube") definuje odpor proti pohybu v potrubí při proudění kapaliny. Lze nastavit i potrubí jiného než kruhového průřezu a ekvivalentní délku místních ztrát [2]. HP₁ reprezentuje krátké potrubí mezi nádrží a čerpadlem, HP₂ potom potrubí za ventilem, kterým byla vedena kapalina zpět do nádrže.

Tube cross section type	Circular	HP ₁	HP ₂	[m]
Tube internal diameter	Vnitřní průměr potrubí	0,0232	0,018	[m]
Tube lenght	Délka potrubí	0,15	2	[m]
Aggregate equivalent lenght of local resistances	Ekvivalentní délka místních ztrát	1	0	[m]
Internal surface roughness	Drsnost vnitřního povrchu	15·10 ⁻⁶	10·10 ⁻⁶	[m]

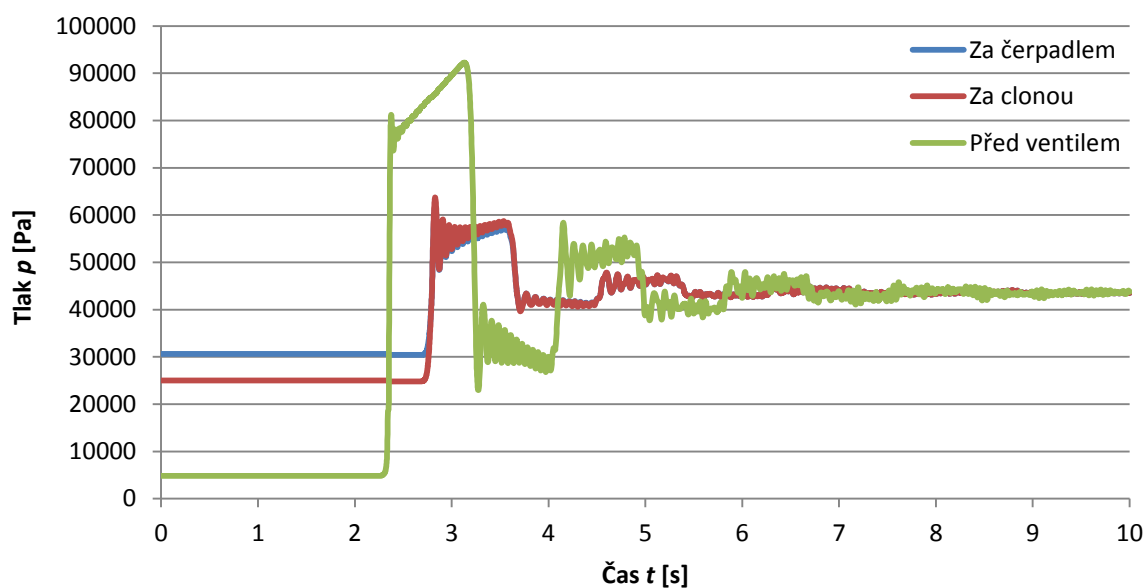
tab. 6.7 Nastavené parametry pro blok Hydraulické potrubí (HP₁, HP₂)

Zdroj signálu (ZS)

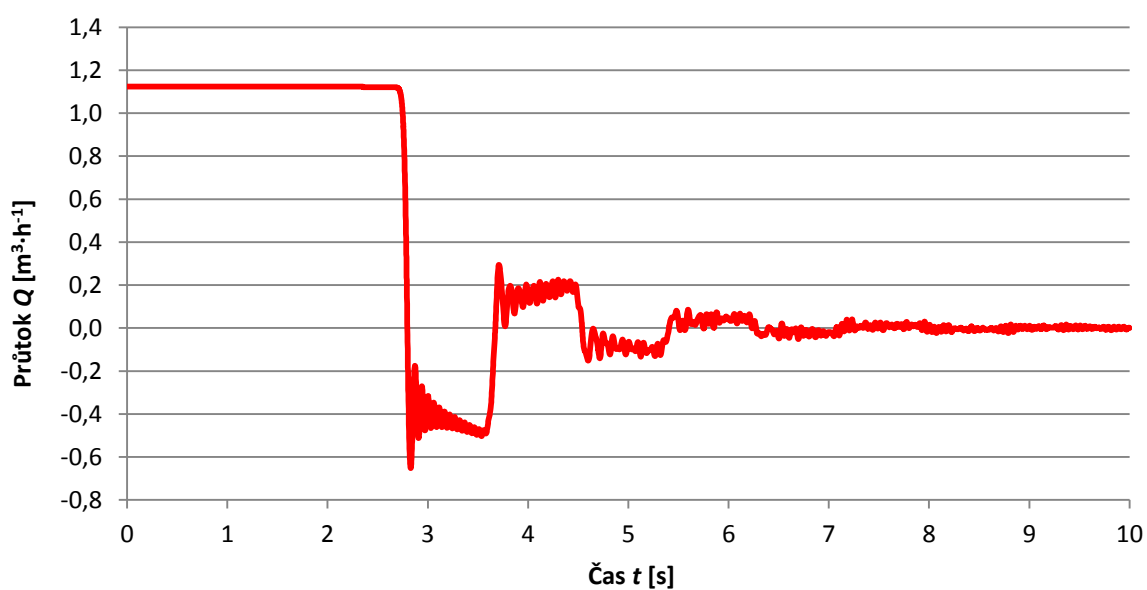
Blok zdroj signálu ("Signal Builder") se používá k otevírání a zavírání jiných řízených prvků podle předem daného průběhu. V této simulaci byl nastaven na stejný průběh uzavření ventilu jako v experimentu (obr. 5.8).

6.1.3. Výsledky simulace

Varianta 1: Vypočtený modul pružnosti z měření rázu a nulový obsah vzduchu

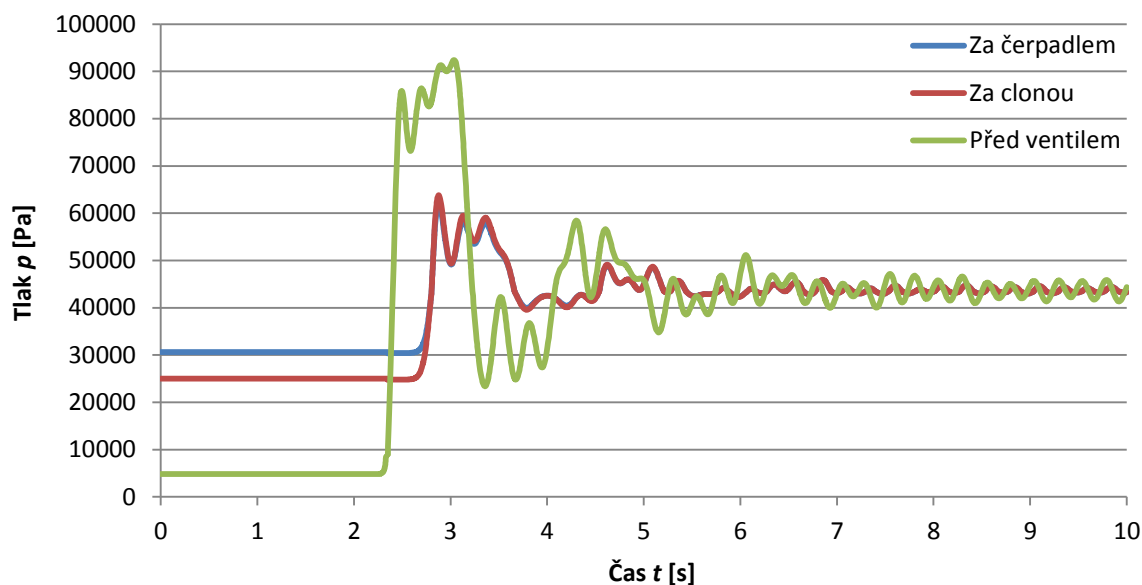


obr. 6.5 Simulace průběhu tlaků při hydraulickém rázu v programu Matlab (Varianta 1)

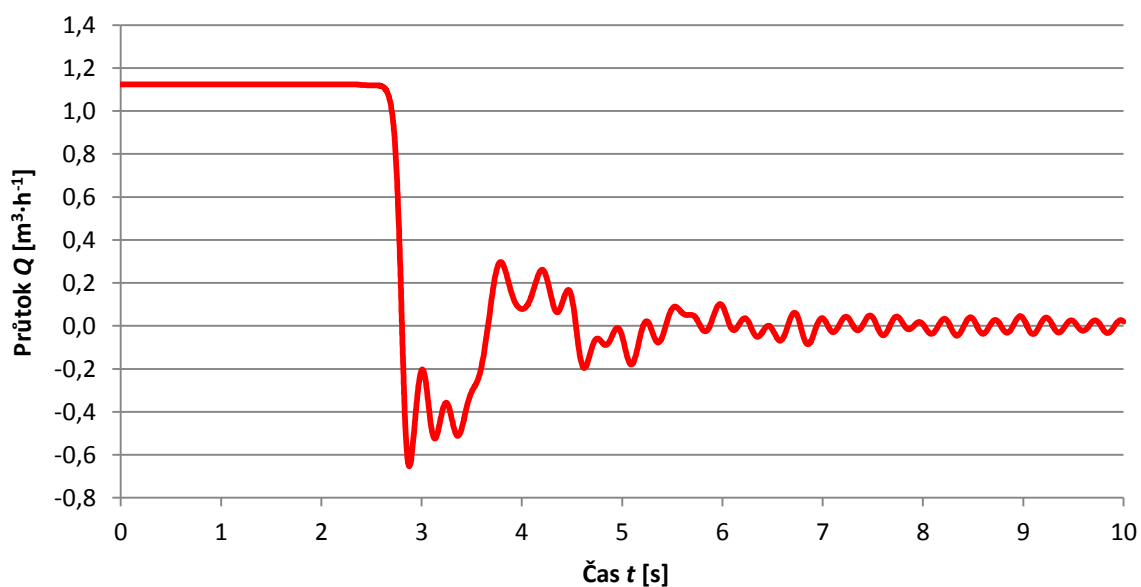


obr. 6.6 Simulace průběhu průtoku v programu Matlab (Varianta 1)

Varianta 2: Teoretický modul pružnosti a objemový zlomek vzduchu $\alpha = 0,02$.



obr. 6.7 Simulace průběhu tlaků při hydraulickém rázu v programu Matlab (Varianta 2)



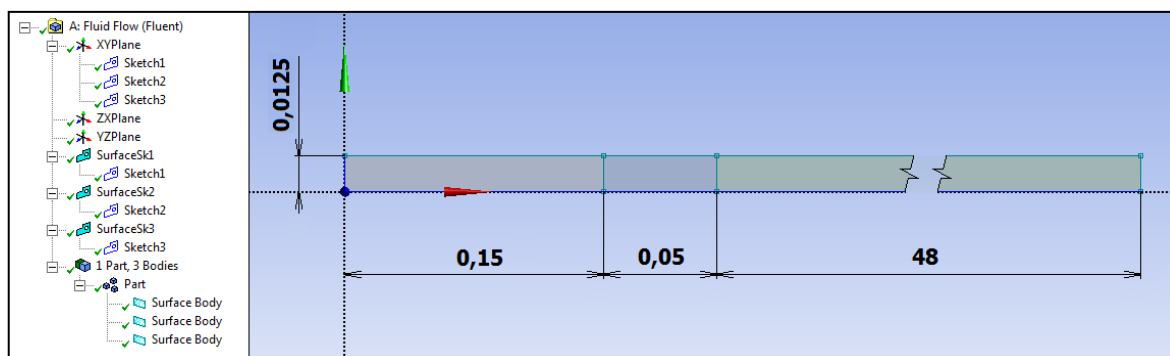
obr. 6.8 Simulace průběhu průtoku v programu Matlab (Varianta 2)

6.2. ANSYS Fluent

Geometrie, fyzikální vlastnosti a okrajové podmínky byly definovány na základě experimentu popsaného v kapitole 5.5. Potrubí použité v experimentu má malý průměr, je ale velmi dlouhé a stočené do spirály. Pro simulaci v programu ANSYS Fluent byla geometrie potrubí zjednodušena. Úloha se řešila jako rovinná (2D) a osově symetrická z důvodu menšího počtu buněk a tedy menších výpočetních nároků a kratšího výpočetního času. Jakékoliv názvy vytvořené v programech Designmodeler, Meshing nebo Fluent jsou psány bez diakritiky a bez mezer, aby se předešlo případným problémům s kompatibilitou.

6.2.1. Tvorba geometrie

Pro vytvoření geometrie byl použit program DesignModeler, který je součástí programového manažeru ANSYS Workbench 16.2. Geometrie byla vytvořena ze tří obdélníků, jejichž výška je rovna polovině vnitřního průměru hadice, tedy 0,0125 m. Je třeba zmínit, že původně měla být výška prvních dvou obdélníků menší, protože na měřicí trati jsou prvky nádrž - čerpadlo - clona spojeny pomocí PVC vodovodní trubky, která má polovinu vnitřního průměru 0,0116 m. Jelikož při zmenšení výšky v DesignModeleru docházelo k problémům při tvorbě sítě, byla výška vstupní části geometrie zmenšena později v programu Fluent. Přesněji je tato úprava popsána později. Délka prvního obdélníku, který reprezentuje vzdálenost čerpadla od nádrže, je 0,15 m. Druhý obdélník je dlouhý 0,05 m a jeho délka je pouze technologická pro přehlednější zadání okrajových podmínek. Třetí obdélník má délku 48 m, což je délka hadice H. Na obr. 6.9 je zobrazena geometrie s rozměry.



obr. 6.9 Vytvoření geometrie

Každý obdélník byl nakreslen příkazem "Rectangle" na samostatnou "Sketch" a vykreslen jako plocha pomocí "Surfaces From Sketches", který je dostupný v záložce "Concept". V detailnějších nastaveních byly všechny obdélníky přidány operací "Add Frozen", která zajistí, že se obdélníky při vykreslování nespojí. Posledním krokem bylo spojit obdélníky do jednoho celku ("Part") příkazem "Form New Part". Tím mezi nimi vznikla vazba a následně vygenerovaná výpočetní síť bude navazovat.

6.2.2. Tvorba sítě

Výpočetní síť byla vytvořena v programu Meshing, který je stejně jako DesignModeler součástí ANSYS Workbench. Síť byla upravována pomocí příkazu "Sizing". První "Edge Sizing" byl umístěn na čtyři svislé hrany ("Edge"). Jeho typ byl nastaven na "Number of Divisions" (počet buněk) a jeho hodnota byla nastavena na 15. Další nastavení bylo pomocí "Bias Type" provedeno tak, aby se velikost buňky sítě zmenšovala směrem ke stěně potrubí (došlo tedy ke zhuštění). "Edge Sizing 2" byl umístěn na dvě vodorovné hrany prvního obdélníku. Typ nastaven opět na "Number of Division", jeho hodnota na 15 buněk a jejich rozdělení rovnoměrné. "Edge Sizing 3" byl nastaven na vodorovných hranách druhého obdélníku, nastavení stejné jako "Edge Sizing 2", jen počet buněk nastaven na 5. U "Edge Sizing 4" bylo opět stejné nastavení a počet buněk nastaven na 5000. Detaily nastavení jednotlivých "Sizing" jsou na obr. 6.10.

Details of "Edge Sizing" - Sizing <table> <tr> <td colspan="2">Scope</td> </tr> <tr> <td>Scoping Method</td> <td>Geometry Selection</td> </tr> <tr> <td>Geometry</td> <td>4 Edges</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Definition</td> </tr> <tr> <td>Suppressed</td> <td>No</td> </tr> <tr> <td>Type</td> <td>Number of Divisions</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Number of Divisions</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Behavior</td> <td>Hard</td> </tr> <tr> <td>Bias Type</td> <td>- - - - -</td> </tr> <tr> <td>Bias Option</td> <td>Bias Factor</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Bias Factor</td> <td>5,</td> </tr> <tr> <td>Reverse Bias</td> <td>2 Edges</td> </tr> </table>	Scope		Scoping Method	Geometry Selection	Geometry	4 Edges	Definition		Suppressed	No	Type	Number of Divisions	<input type="checkbox"/> Number of Divisions	15	Behavior	Hard	Bias Type	- - - - -	Bias Option	Bias Factor	<input type="checkbox"/> Bias Factor	5,	Reverse Bias	2 Edges	Details of "Edge Sizing 2" - Sizing <table> <tr> <td colspan="2">Scope</td> </tr> <tr> <td>Scoping Method</td> <td>Geometry Selection</td> </tr> <tr> <td>Geometry</td> <td>2 Edges</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Definition</td> </tr> <tr> <td>Suppressed</td> <td>No</td> </tr> <tr> <td>Type</td> <td>Number of Divisions</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Number of Divisions</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Behavior</td> <td>Hard</td> </tr> <tr> <td>Bias Type</td> <td>No Bias</td> </tr> </table>	Scope		Scoping Method	Geometry Selection	Geometry	2 Edges	Definition		Suppressed	No	Type	Number of Divisions	<input type="checkbox"/> Number of Divisions	15	Behavior	Hard	Bias Type	No Bias
Scope																																											
Scoping Method	Geometry Selection																																										
Geometry	4 Edges																																										
Definition																																											
Suppressed	No																																										
Type	Number of Divisions																																										
<input type="checkbox"/> Number of Divisions	15																																										
Behavior	Hard																																										
Bias Type	- - - - -																																										
Bias Option	Bias Factor																																										
<input type="checkbox"/> Bias Factor	5,																																										
Reverse Bias	2 Edges																																										
Scope																																											
Scoping Method	Geometry Selection																																										
Geometry	2 Edges																																										
Definition																																											
Suppressed	No																																										
Type	Number of Divisions																																										
<input type="checkbox"/> Number of Divisions	15																																										
Behavior	Hard																																										
Bias Type	No Bias																																										
Details of "Edge Sizing 3" - Sizing <table> <tr> <td colspan="2">Scope</td> </tr> <tr> <td>Scoping Method</td> <td>Geometry Selection</td> </tr> <tr> <td>Geometry</td> <td>2 Edges</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Definition</td> </tr> <tr> <td>Suppressed</td> <td>No</td> </tr> <tr> <td>Type</td> <td>Number of Divisions</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Number of Divisions</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Behavior</td> <td>Hard</td> </tr> <tr> <td>Bias Type</td> <td>No Bias</td> </tr> </table>	Scope		Scoping Method	Geometry Selection	Geometry	2 Edges	Definition		Suppressed	No	Type	Number of Divisions	<input type="checkbox"/> Number of Divisions	5	Behavior	Hard	Bias Type	No Bias	Details of "Edge Sizing 4" - Sizing <table> <tr> <td colspan="2">Scope</td> </tr> <tr> <td>Scoping Method</td> <td>Geometry Selection</td> </tr> <tr> <td>Geometry</td> <td>2 Edges</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Definition</td> </tr> <tr> <td>Suppressed</td> <td>No</td> </tr> <tr> <td>Type</td> <td>Number of Divisions</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Number of Divisions</td> <td>5000</td> </tr> <tr> <td>Behavior</td> <td>Hard</td> </tr> <tr> <td>Bias Type</td> <td>No Bias</td> </tr> </table>	Scope		Scoping Method	Geometry Selection	Geometry	2 Edges	Definition		Suppressed	No	Type	Number of Divisions	<input type="checkbox"/> Number of Divisions	5000	Behavior	Hard	Bias Type	No Bias						
Scope																																											
Scoping Method	Geometry Selection																																										
Geometry	2 Edges																																										
Definition																																											
Suppressed	No																																										
Type	Number of Divisions																																										
<input type="checkbox"/> Number of Divisions	5																																										
Behavior	Hard																																										
Bias Type	No Bias																																										
Scope																																											
Scoping Method	Geometry Selection																																										
Geometry	2 Edges																																										
Definition																																											
Suppressed	No																																										
Type	Number of Divisions																																										
<input type="checkbox"/> Number of Divisions	5000																																										
Behavior	Hard																																										
Bias Type	No Bias																																										

obr. 6.10 Detaily nastavení jednotlivých "Edge Sizing"

Poslední úprava sítě byla provedena pomocí "Face Meshing". Byly označeny plochy všech tří obdélníků a jako metoda zvolena "Quadrilaterals" (čtyřúhelníky). Nastavení je vidět na obr. 6.11. V detailech sítě jsem ponechal původní nastavení, viz obr. 6.12.

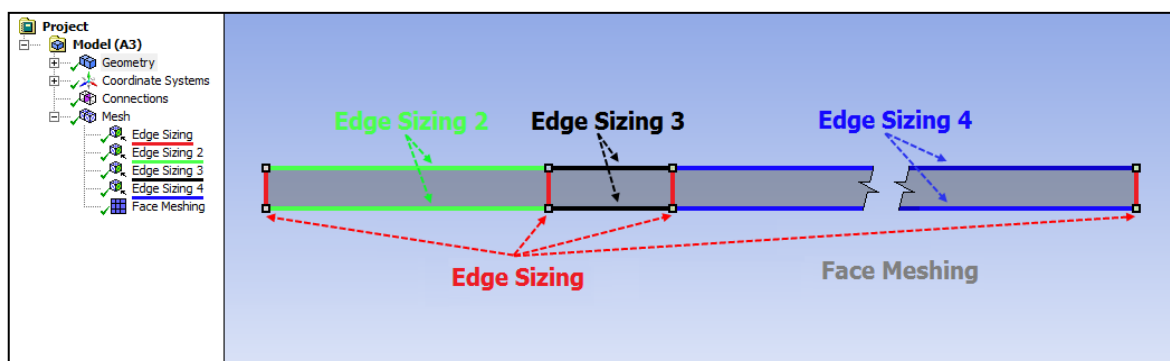
Details of "Face Meshing" - Mapped Face Meshing	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	3 Faces
[-] Definition	
Suppressed	No
Mapped Mesh	Yes
Method	Quadrilaterals
Constrain Boundary	No
[-] Advanced	
Specified Sides	No Selection
Specified Corners	No Selection
Specified Ends	No Selection

obr. 6.11 Detaily nastavení "Face Meshing"

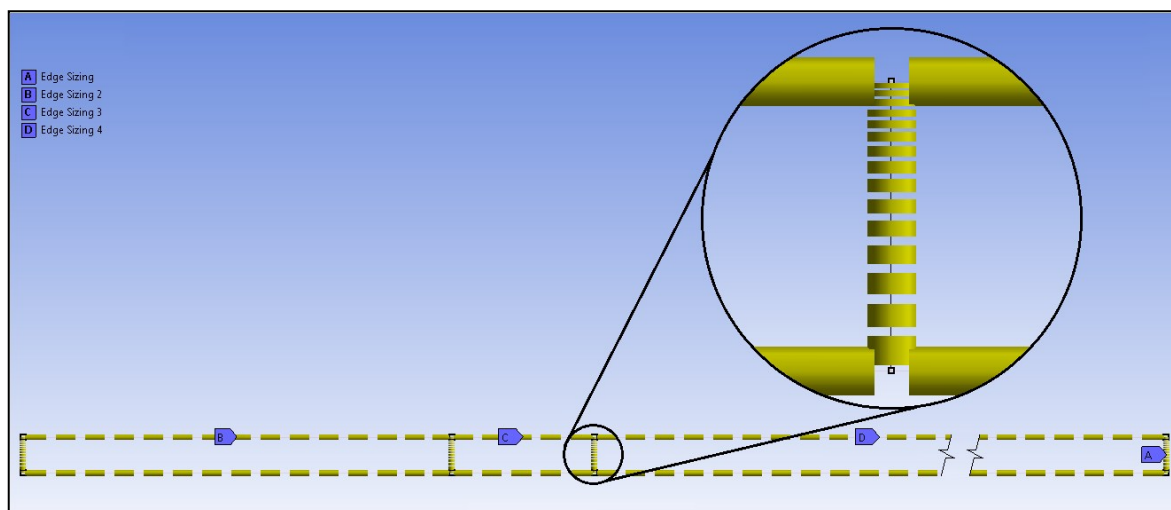
Details of "Mesh"	
[-] Sizing	
Use Advanced Si...	On: Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Nor...	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (2,4025e-002 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (2,40250 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (4,80490 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge L...	1,25e-002 m

obr. 6.12 Detaily sítě

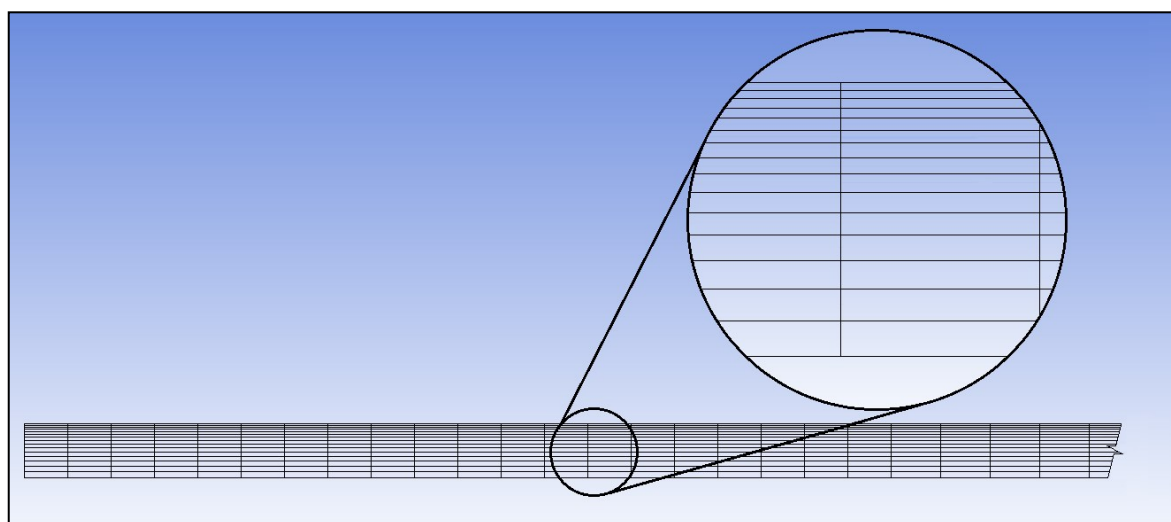
Přehledně je vidět umístění jednotlivých "Sizing" a "Face Meshing" na obr. 6.13 a obr. 6.14. Dále byla vygenerovaná síť, jejíž podoba je na obr. 6.15, síť obsahuje 75 300 buněk.



obr. 6.13 Umístění prvků pro úpravu sítě (Edge Sizing a Face Meshing)

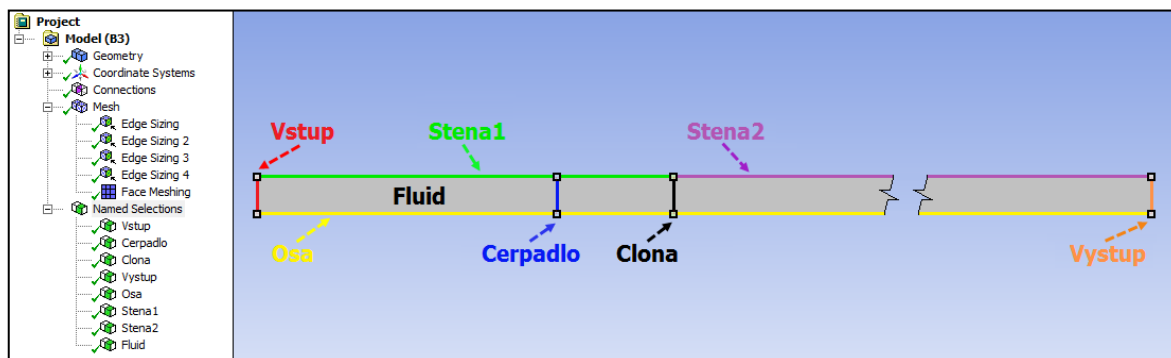


obr. 6.14 Předběžný návrh sítě na geometrii s detailem zhuštění směrem ke stěně



obr. 6.15 Část vygenerované sítě s detailem zhuštění

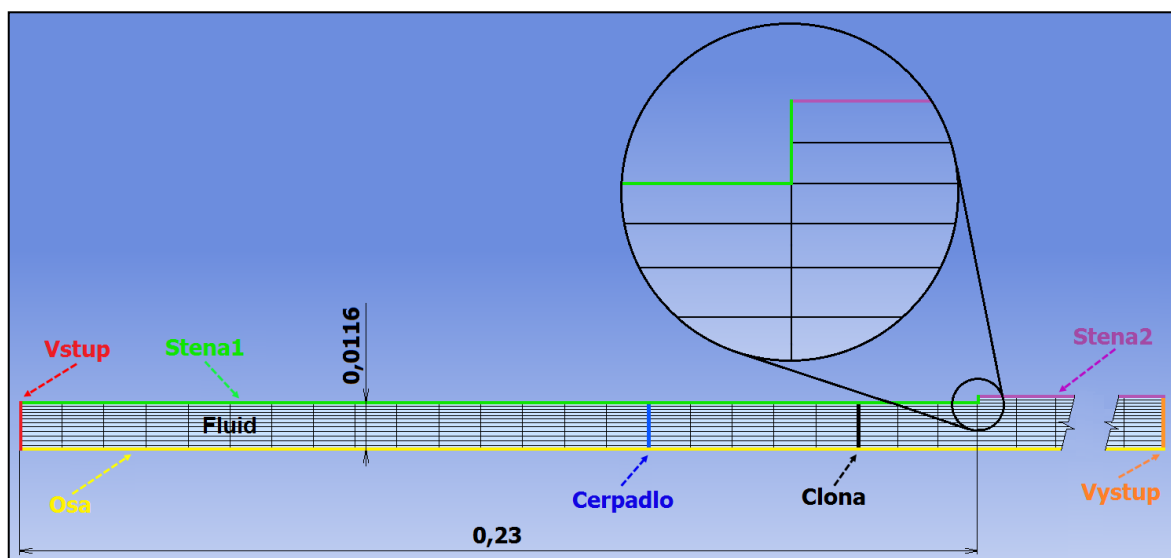
Nakonec byly pojmenovány okrajové podmínky příkazem "Create Named Selection". Pojmenování je důležité z důvodu následného definování okrajových podmínek v programu Fluent. Celkem vzniklo 8 podmínek, které jsou zobrazeny na obr. 6.16.



obr. 6.16 Okrajové podmínky

6.2.3. Nastavení Fluentu

Nejprve bylo nutné zkontrolovat správný přenos geometrie z programu Meshing, konkrétně jednotky a správné umístění okrajových podmínek. Dalším krokem byla úprava geometrie, o které už byla zmínka v kapitole 6.2.1. Pomocí příkazu "Region" v záložce "Adapt" byla vyměřena oblast o rozměrech 0,0009 m x 0,23 m a příkazem "Mark" označena. Poté byl příkazem "Separate"/"Cells" v záložce "Mesh" tento úzký obdélník z geometrie oddělen a příkazem "Zone"/"Delete" v záložce "Mesh" smazán. Díky tomu se výška vstupní části geometrie zmenšila. Po této úpravě byla tedy výška rovna polovině vnitřního průměru potrubí, které spojuje prvky nádrží - čerpadlo - clona, konkrétně 0,0116 m. Tato úprava byla provedena do délky 0,23 m od vstupu (obr. 6.17). Nevýhodou tohoto kroku bylo odebrání 2 vrstev zhuštěných buněk u stěny, přesto je však zhuštění zbylých buněk dostatečné. Celkem jich bylo odebráno 46, tím se celkový počet buněk sítě snížil na 75 254.



obr. 6.17 Úprava geometrie a okrajových podmínek

Úloha byla řešena jako osově symetrická a časově závislá se zvoleným časovým krokem 0,001 s. Z důvodů nižších hodnot Reynoldsova čísla byl jako výpočetní model zvolen dvourovnicový turbulentní model k- ϵ RNG, nastavení stěnové funkce bylo "Standard Wall Function".

Jako proudící médium byla z databáze Fluentu vybrána voda ("water-liquid"). Kapalina byla zvolena jako stlačitelná - "compressible-liquid", její nastavené vlastnosti jsou v tab. 6.8. Modul pružnosti kapaliny byl nastaven na hodnotu získanou z měření hydraulického rázu (viz kapitola 5.5).

Reference Pressure	Referenční tlak	101 325	[Pa]
Reference Density	Referenční hustota	998,2	[kg·m ⁻³]
Reference Bulk Modulus	Modul pružnosti kapaliny	12 438 360	[Pa]
Density Exponent	Exponent hustoty	1	[1]
Dynamic Viscosity	Dynamická viskozita	0,001003	[Pa·s]

tab. 6.8 Nastavené parametry pro kapalinu (Fluent)

V nastavení okrajových podmínek ("Boundary Conditions") byly zvoleny takové typy podmínek, které se jevily jako nejvhodnější pro danou problematiku. Tyto podmínky byly nastaveny na základě změřených a vypočtených hodnot. V položce "Operating Conditions" byl jako "Operating Pressure" nastaven tlak 0 Pa.

Název okrajové podmínky:	Typ okrajové podmínky:
- Vstup	"Pressure-Inlet"
- Čerpadlo	"Fan"
- Clona	"Porous-Jump"
- Vystup	"Velocity-Inlet"
- Stena1	"Wall"
- Stena2	"Wall"
- Osa	"Axis"
- Fluid	"Interior"

Okrajová podmínka Vstup

Byla definovaná jako "Pressure-Inlet". Tlak na vstupu byl uvažován jako totální, který je součtem statického a dynamického tlaku. Statický tlak p_{stat} byl počítán jako hydrostatický, vyvolaný sloupцем vody v nádrži. Dynamický tlak p_{dyn} závisí na rychlosti proudění v potrubí. Do Fluentu byl tlak na vstupu zadán jako absolutní. Výška hladiny v nádrži od osy sacího potrubí byla $h = 0,25$ m. Turbulence byla definovaná metodou "Intensity and Hydraulic Diameter". Jako hydraulický průměr byl zadán vstupní průměr geometrie, který je roven světlosti potrubí před čerpadlem.

$$p_{stat} = h \cdot \rho \cdot g = 0,25 \cdot 998,2 \cdot 9,81 = 2\,448,1 \text{ [Pa]}$$

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{0,000311}{\frac{\pi \cdot 0,0232^2}{4}} = 0,736 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 998,2 \cdot 0,736^2 = 270,2 \text{ [Pa]}$$

$$p_{tot} = p_{stat} + p_{dyn} = 2\,448,1 + 270,2 = 2\,718,3 \text{ [Pa]}$$

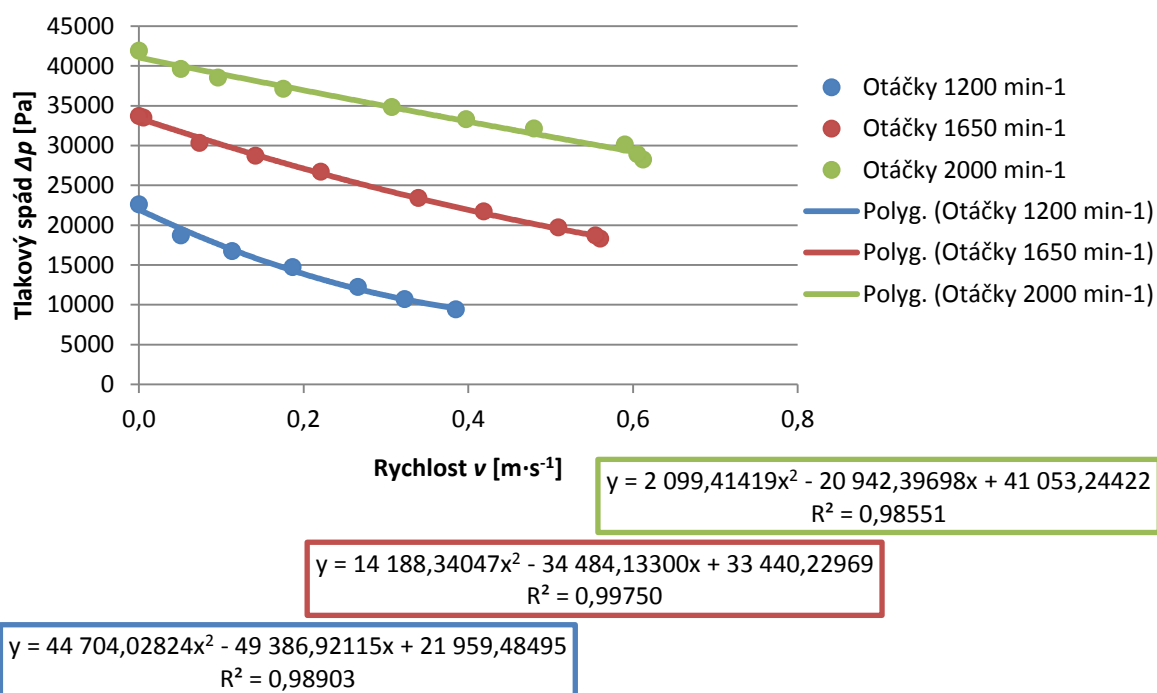
Absolutní totální tlak je tedy: $101\,325 + 2\,718,3 = 104\,043,3 \text{ [Pa]}$

Gauge Total Pressure	Totální tlak	104 043,3	[Pa]
Turbulent Intensity	Intenzita turbulence	1	[%]
Hydraulic Diameter	Hydraulický průměr	0,0232	[m]

tab. 6.9 Nastavené parametry pro okrajovou podmínku Vstup

Okrajová podmínka Čerpadlo

Podmínka byla definovaná jako "Fan" a umožňuje zadávání charakteristiky prvku pomocí polynomu. Na základě naměřených hodnot charakteristiky čerpadla (kapitola 5.2) byl vytvořen graf závislosti tlakového spádu na rychlosti proudění (obr. 6.18). Byla použita spojnice trendu (polynomická 2. řádu) a zobrazena rovnice regrese ve tvaru: $\Delta p = a_2 \cdot v^2 + a_1 \cdot v + a_0$. V simulaci byly použity koeficienty z rovnice regrese pro otáčky $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, ostatní otáčky jsou vykresleny pouze doplňkově.



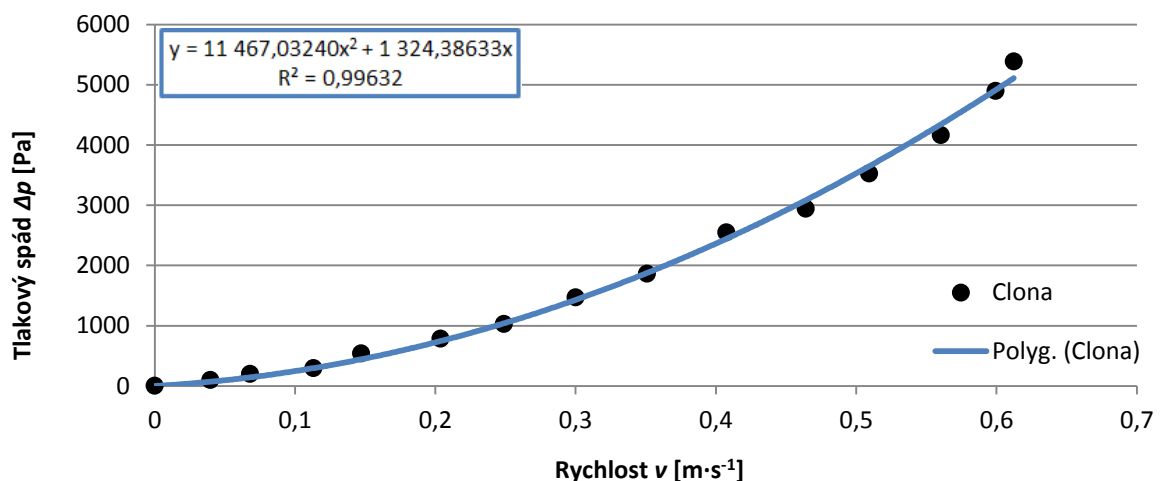
obr. 6.18 Závislost tlakového spádu na rychlosti proudění v čerpadle s rovnicemi regrese

First Coefficient	První koeficient	41 053,24422	[1]
Second Coefficient	Druhý koeficient	-20 942,39698	[1]
Third Coefficient	Třetí koeficient	2 099,41419	[1]

tab. 6.10 Nastavené parametry pro okrajovou podmínku Cerpadlo

Okrajová podmínka Clona

Byla definována jako "Porous-Jump". Z hodnot získaných při měření charakteristiky clony (kapitola 5.3) byla vytvořena závislost tlakové ztráty na rychlosti proudění (obr. 6.19) a pomocí spojnice trendu (polynomická 2. řádu) byla zobrazena rovnice regrese ve tvaru $\Delta p = A_2 \cdot v^2 + A_1 \cdot v$. Z rovnice (4.17) a koeficientů (A_1 , A_2) získaných z rovnice regresní funkce se odvodily rovnice (6.3) a (6.4) a vypočítaly koeficienty C_2 a $1/\alpha$. [10]. Třetí hodnota, která se do této okrajové podmínky zadala, byla tloušťka vrstvy t , pro kterou je potřeba znát tlakovou ztrátu. V tomto případě to byla vzdálenost od odběrného místa 1 k odběrnému místu 2 (obr. 5.1), tedy míst, pomocí kterých byla měřena tlaková ztráta na cloně.



obr. 6.19 Graf závislosti Δp - v s rovnici regrese

$$A_2 = C_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot t \quad \rightarrow \quad (6.3)$$

$$\rightarrow C_2 = \frac{2 \cdot A_2}{\rho \cdot t} = \frac{2 \cdot 11\,467,03240}{998,2 \cdot 0,49} = 46,8886 \text{ [m}^{-1}\text{]}$$

$$A_1 = \frac{\eta}{\alpha} \cdot t \quad \rightarrow \quad (6.4)$$

$$\rightarrow \frac{1}{\alpha} = \frac{A_1}{\eta \cdot t} = \frac{1\,324,38633}{0,001003 \cdot 0,49} = 2\,694\,745,01 \text{ [m}^2\text{]}$$

Face Permeability	Permeabilita	2 694 745,01	[m ²]
Porous Medium Thickness	Tloušťka porézní vrstvy	0,49	[m]
Pressure-Jump Coefficient	Koeficient stoupnutí tlaku	46,8886	[m ⁻¹]

tab. 6.11 Nastavené parametry pro okrajovou podmínku Clona

Okrajová podmínka Stena1

Byla zvolena jako typ "Wall". Touto podmínkou jsou definovány stěny potrubí a spojovacích armatur, které spojují prvky Nádrž - Čerpadlo - Clona. Délka geometrie, na kterou je tato podmínka nastavena je poměrně malá (0,23 m) a při zvolené drsnosti nemá zásadní vliv na výpočet. Protože se jedná o nepohyblivou stěnu, byla zvolena položka "Stationary Wall".

Roughness Height	Výška drsnosti	$15 \cdot 10^{-6}$	[m]
Roughness Constant	Konstanta drsnosti	0,5	[1]

tab. 6.12 Nastavené parametry pro okrajovou podmínku Stena1

Okrajová podmínka Stena2

Podmínka typu "Wall" byla zvolena pro oblast reprezentující potrubí dlouhé 48 m, které bylo při experimentu stočené do spirály. Toto zakřivení vyvolává místní ztráty způsobené odstředivou silou. S ohledem na tuto skutečnost byla drsnost v potrubí zvolena $0,5 \cdot 10^{-3}$ m. Jedná se rovněž o nepohyblivou stěnu, proto byla zvolena položka "Stationary Wall".

Roughness Height	Výška drsnosti	$0,5 \cdot 10^{-3}$	[m]
Roughness Constant	Konstanta drsnosti	0,5	[1]

tab. 6.13 Nastavené parametry pro okrajovou podmínku Stena2

Okrajová podmínka Osa

Jedná se o osu symetrie. Okrajová podmínka byla zvolena typu "Axis".

Okrajová podmínka Fluid

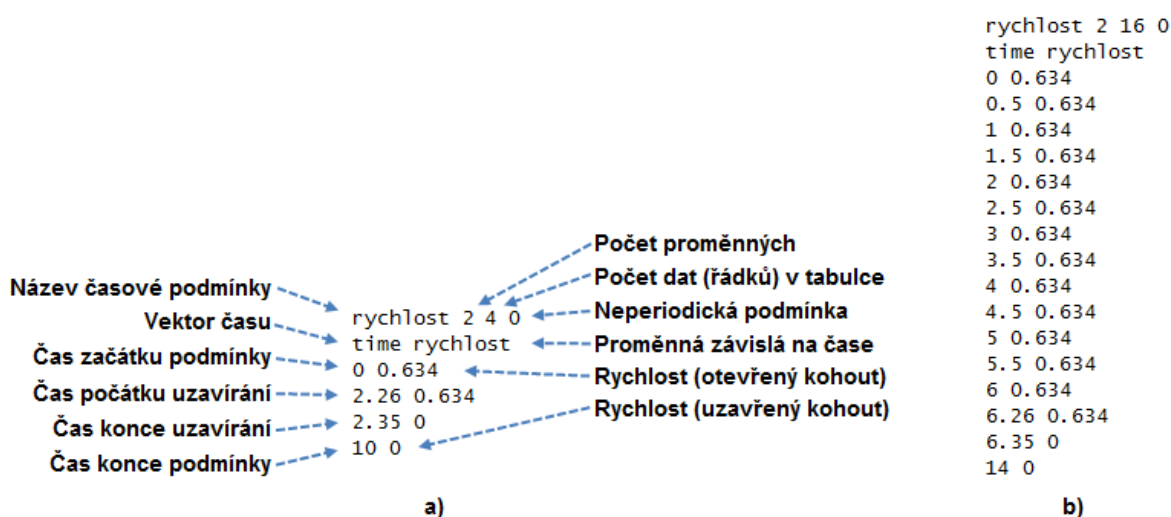
Jde o vnitřní oblast geometrie reprezentující kapalinu. Podmínka byla zvolena typu "Interior".

Okrajová podmínka Vystup

Tato podmínka byla definována jako "Velocity-Inlet". Jako metoda specifikace rychlosti byla zvolena "Magnitude and Direction", tedy velikost a směr. Velikost rychlosti byla spočítána z naměřeného objemového průtoku Q a vnitřního průměru hadice d . V položce "Axial-Component of Flow Direction" se nastaví konstanta 1, tedy směr proudění bude v kladném směru osy potrubí. Turbulence byla definovaná metodou "Intensity and Hydraulic Diameter". Jako hydraulický průměr byl zadán výstupní průměr geometrie, který je roven světlosti hadice.

$$v = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{0,000311}{\frac{\pi \cdot 0,025^2}{4}} = 0,634 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Program Fluent neumožňuje vložit do simulace jakýkoliv blok, kterým by šlo realizovat uzavření průtočného průřezu tak, jak je to provedeno například v programu Matlab SimHydraulics. Proto byla pro simulaci uzavření kulového kohoutu a následného hydraulického rázu vytvořena časová okrajová podmínka, která zajistila skokovou změnu rychlosti na výstupu z hodnoty $0,634 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (otevřený kohout) na hodnotu $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (uzavřený kohout). Podmínka byla vytvořena v textovém editoru s příponou txt. Časy průběhu uzavírání a celkový čas trvání simulace byly shodné s experimentem (obr. 5.8). Přesný formát této podmínky s jejím popisem je na obr. 6.20a.



obr. 6.20 Časové okrajové podmínky

Velocity Magnitude	Velikost rychlosti	časová podmínka	[m·s ⁻¹]
Turbulent Intensity	Intenzita turbulence	1	[%]
Hydraulic Diameter	Hydraulický průměr	0,025	[m]

tab. 6.14 Nastavené parametry pro okrajovou podmínku Vystup

Monitorovací body:

Aby bylo možné zaznamenávat potřebné průběhy simulovaných tlaků a průtoku v závislosti na čase, musely být vytvořeny tzv. monitorovací body, které se vytvářejí v nabídce "Monitors"/"Surface Monitors". Pro vytvoření monitorovacího bodu bylo nutné zadat jeho název, typ a proměnnou, kterou bylo potřeba zaznamenat. Dále zvolit závislost proměnné na čase a vybrat místo v geometrii, kde má být tato proměnná snímána. Pro snímání tlaků za čerpadlem a za clonou byly vytvořeny tzv. hladiny pomocí příkazu "Iso-Surface" v záložce "Surface". První hladina s názvem "za_cerpadlem" byla vytvořena 20 mm za okrajovou podmínkou Cerpadlo, druhá s názvem "za_clonou" 20 mm za okrajovou podmínkou Clona. Monitorovací bod "tlak_pred_ventilem" byl umístěn na okrajové podmínce Vystup a bod "prutok" na okrajové podmínce Clona.

Jméno monitorovacího bodu	Typ	Proměnná	Umístění v geometrii
tlak_za_cerpadlem	Area-Weighted Average	Pressure/Static Pressure	za_cerpadlem
tlak_za_clonou	Area-Weighted Average	Pressure/Static Pressure	za_clonou
tlak_pred_ventilem	Area-Weighted Average	Pressure/Static Pressure	Vystup
prutok	Volume Flow Rate	-	Clona

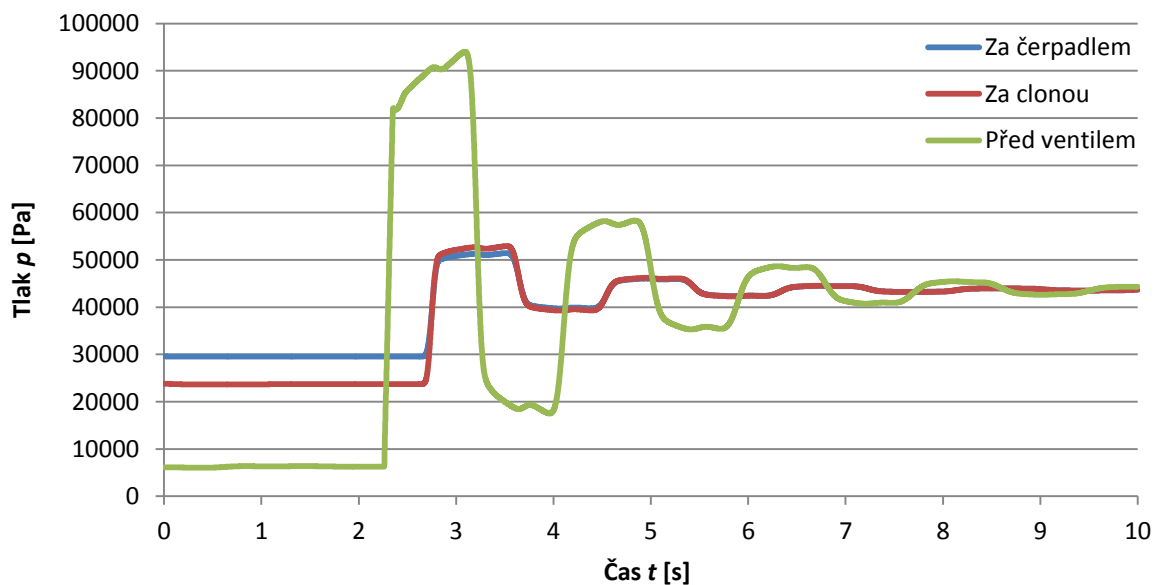
tab. 6.15 Seznam monitorovacích bodů

Před spuštěním výpočtu bylo potřeba provést inicializaci, tedy nastavit z jakých počátečních hodnot bude Fluent počítat. Byla zvolena okrajová podmínka Vystup a jako počáteční hodnota tlaku nastavena 101 325 Pa. V případě časově závislého řešení bylo nutné zvolit velikost časového kroku. Ten byl proto nastaven na hodnotu 0,001s. Počet časových kroků byl nastaven na 2 000 000. Poté byl spuštěn výpočet.

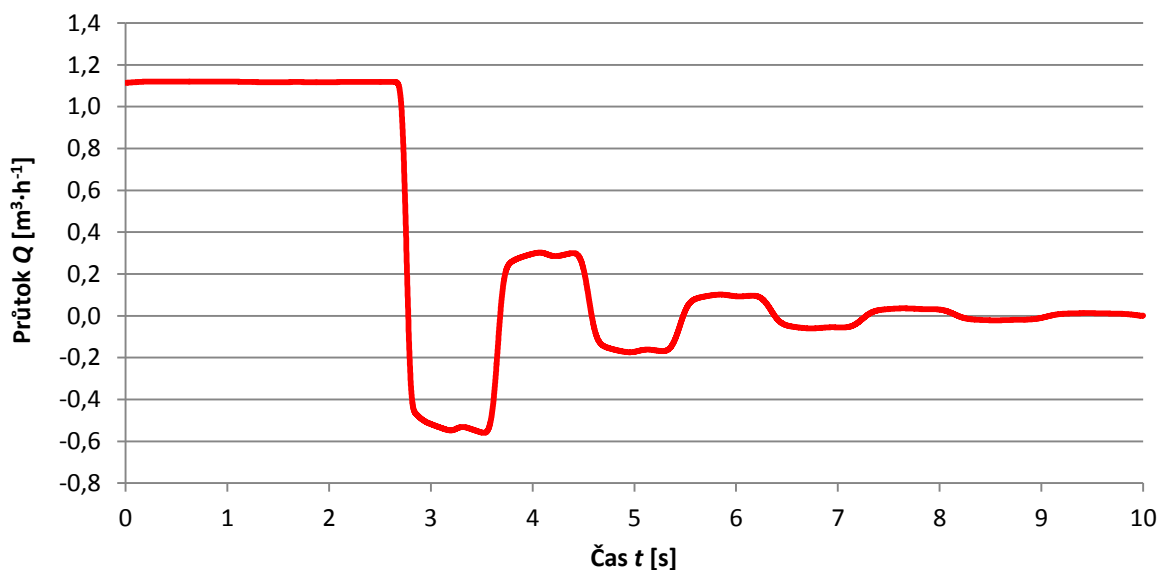
Během simulace se zjistilo, že vykreslované průběhy tlaků a průtoku jsou v ustálených stavech při otevřeném ventilu dosti rozkmitané. Je to způsobeno tím, že Fluent potřebuje po inicializaci více času, aby tyto "výkyvy" ustálil. Proto byla časová podmínka mírně

upravena. Začátek skokové změny rychlosti byl posunut o 4 sekundy na hodnotu času 6,26 sekund (obr. 6.20b). Tím získal Fluent více času, aby mohl průběhy ustálit. Tento přičtený čas byl později při následné úpravě hodnot z monitorovacích bodů v programu Excel zase odečten. Úprava hodnot po skončení simulace dále spočívala v převedení absolutního tlaku z Fluentu na relativní a úpravě průtoku.

6.2.4. Výsledky simulace



obr. 6.21 Simulace průběhu tlaků při hydraulickém rázu v programu Fluent



obr. 6.22 Simulace průběhu průtoku při hydraulickém rázu v programu Fluent

7. Porovnání výsledků

V tab. 7.1 jsou porovnány naměřené hodnoty s hodnotami získanými z matematických simulací, konkrétně ustálené stavy tlaků a průtoků při otevřeném kulovém kohoutu. Tyto hodnoty byly počítány jako aritmetický průměr z prvních dvou sekund získaných průběhů tlaků a průtoků. V tab. 7.2 jsou naopak porovnány ustálené stavy při uzavřeném kohoutu a hodnoty jsou počítány jako aritmetický průměr z posledních dvou sekund získaných průběhů. U každé simulace je také uvedeno o kolik procent se odlišuje od ustáleného stavu naměřených hodnot. Rozdíly se ve většině případů pohybují do 5%, pouze u simulace ve Fluentu jsou hodnoty před ventilem o 25% vyšší než u naměřených hodnot.

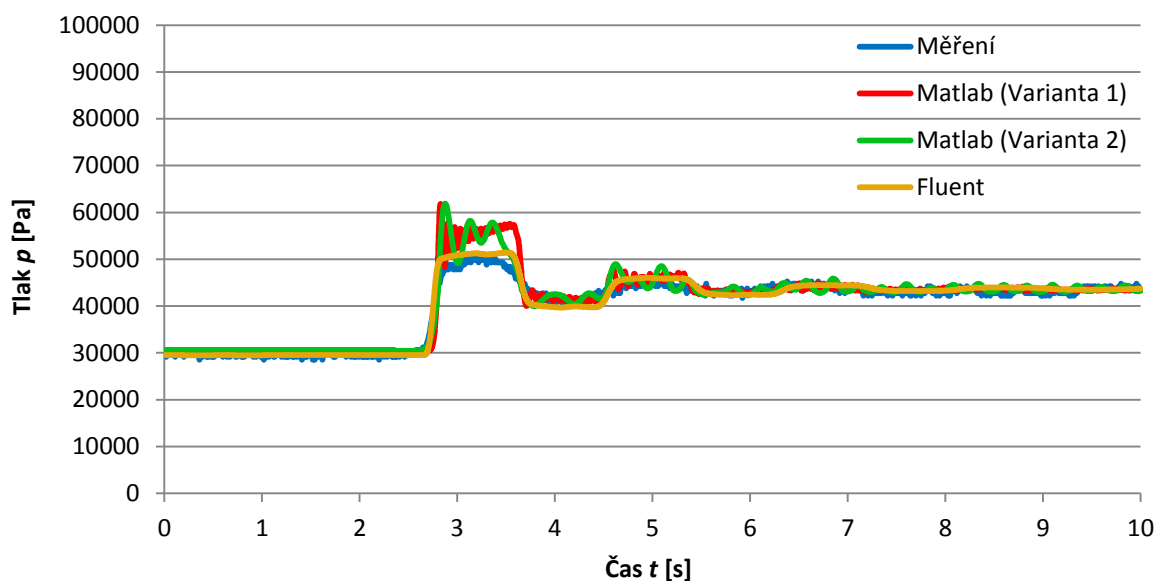
		Měření	Matlab (Varianta 1)	Rozdíl [%]	Matlab (Varianta 2)	Rozdíl [%]	Fluent	Rozdíl [%]
Za čerpadlem	[Pa]	29599,1	30658,1	3,6	30658,1	3,6	29534,6	0,2
Za clonou	[Pa]	23782,9	25007,9	5,2	25007,9	5,2	23702,4	0,3
Před ventilem	[Pa]	4985,3	4817,6	3,4	4817,6	3,4	6244,8	25,3
Průtok	[m ³ ·h ⁻¹]	1,120	1,124	0,3	1,124	0,3	1,119	0,1

tab. 7.1 Ustálené stavy při otevřeném kulovém kohoutu

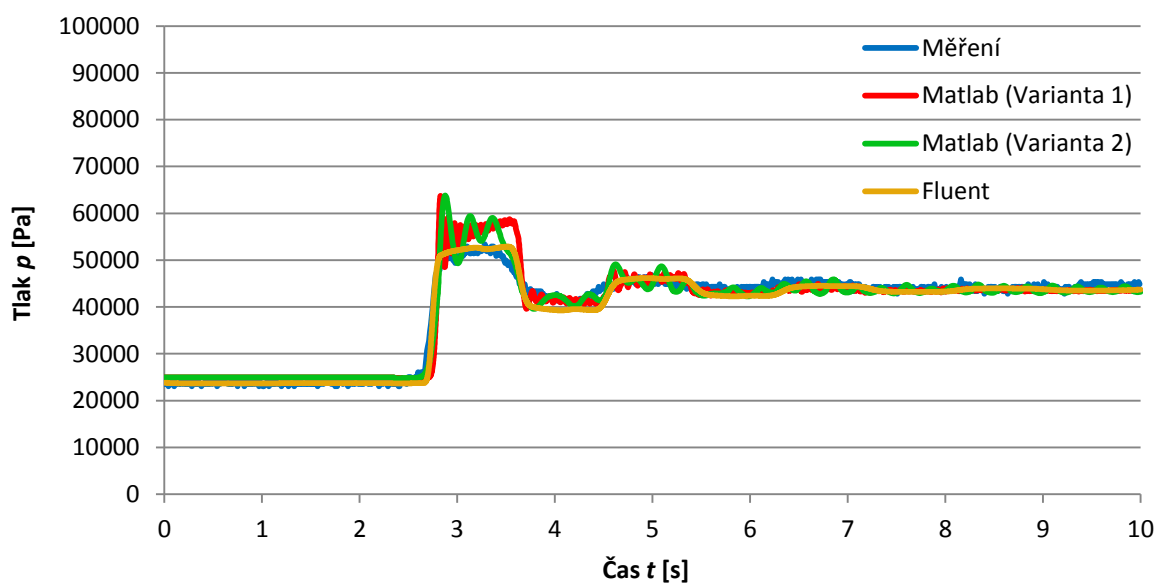
		Měření	Matlab (Varianta 1)	Rozdíl [%]	Matlab (Varianta 2)	Rozdíl [%]	Fluent	Rozdíl [%]
Za čerpadlem	[Pa]	43284,1	43583,5	0,7	43528,1	0,6	43704,2	1,0
Za clonou	[Pa]	44235,6	43584,4	1,5	43528,3	1,6	43705,0	1,2
Před ventilem	[Pa]	43973,5	43567,1	0,9	44373,4	0,9	43896,4	0,2
Průtok	[m ³ ·h ⁻¹]	0	0	0	0	0	0	0

tab. 7.2 Ustálené stavy při uzavřeném kulovém kohoutu

Na obr. 7.1 je zobrazeno srovnání naměřených průběhů tlaků za čerpadlem se simulovanými. Hodnoty ustálených stavů jsou pro všechna řešení přibližně stejné. Simulace z programu Fluent kopíruje průběh naměřeného tlaku přesněji, než simulace z Matlabu. Pravděpodobně je to způsobeno tím, že Fluent ve vícerozměrném proudění zohledňuje rychlostní profil na rozdíl od jednorozměrného proudění v Matlabu. Podobný průběh tlaku byl zaznamenán i za clonou (obr. 7.2).

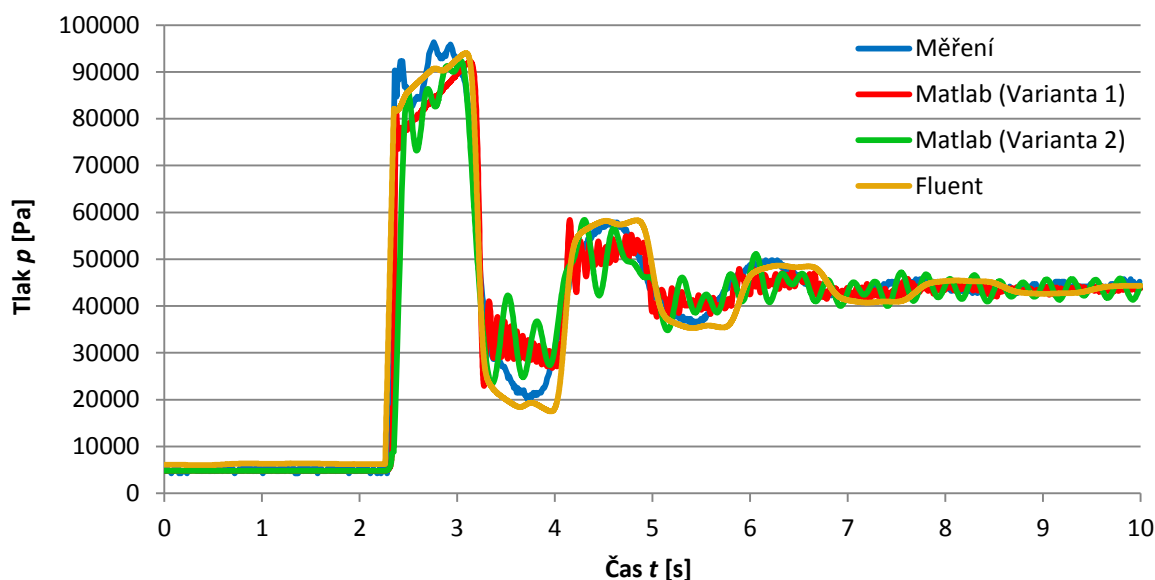


obr. 7.1 Porovnání průběhů tlaků za čerpadlem



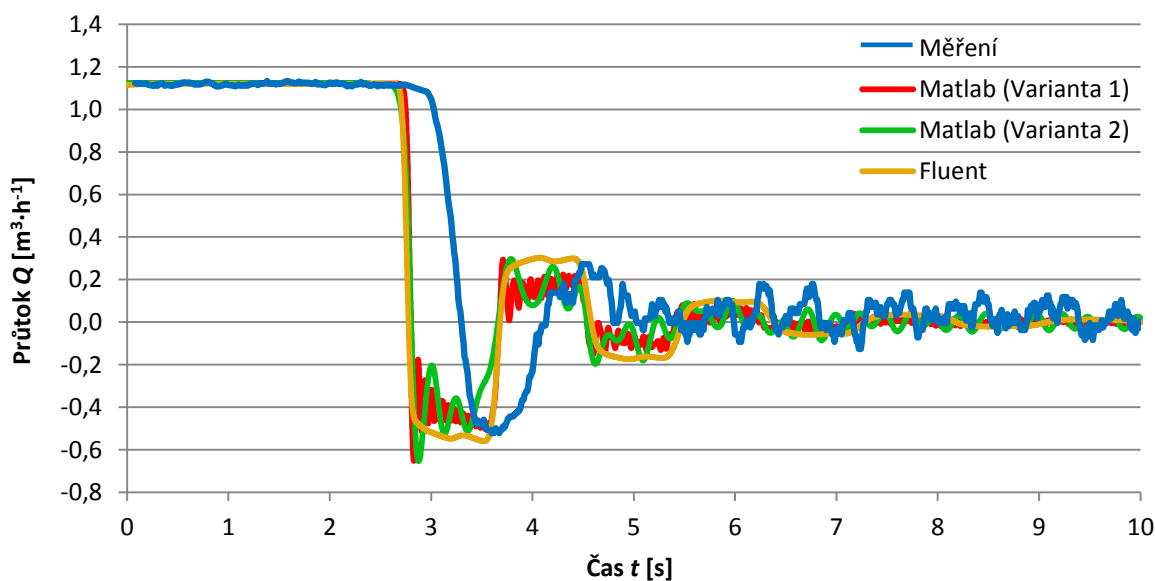
obr. 7.2 Porovnání průběhů tlaků za clonou

Dále byly srovnány průběhy tlaků před ventilem (obr. 7.3). V ustálených stavech se nejvíce naměřeným hodnotám podobají obě varianty z Matlabu. Tvarem maximální amplitudy je velice podobná druhá varianta v Matlabu ($K = 2 \cdot 10^9$, $\alpha = 0,02$). Tato varianta zohledňuje obsah vzduchu, a tudíž mění hustotu v závislosti na tlaku.



obr. 7.3 Porovnání průběhů tlaků před ventilem

Porovnání průtoků je zobrazeno na obr. 7.4. V ustálených stavech při otevřeném kohoutu jsou rozdíly v řádu desetin procent, je zde tedy výborná shoda s měřením. Experimentální měření dynamického průtoku je poměrně obtížné.



obr. 7.4 Porovnání průběhů průtoků

8. Závěr

Tato diplomová práce se věnovala metodám simulace hydraulického rázu v nízkotlakém hydraulickém systému.

První část práce se zabývá problematikou stlačitelnosti kapalin. Na stlačitelnost kapalin má zásadní vliv obsah vzduchu a modul objemové pružnosti. Dále je probrána teorie hydraulického rázu a popsány metody jeho zkoumání.

Další kapitola se věnuje popisu měřicího obvodu. Pro následnou verifikaci matematických modelů bylo nezbytné proměřit charakteristiky důležitých prvků obvodu (čerpadlo, clona, kulový kohout), případně vypočítat ztrátové a průtokové součinitele. Dále bylo provedeno samotné měření hydraulického rázu na zkoumaném obvodu a vyhodnoceny dynamické parametry.

Následující část práce je věnována modelování rázu simulačními metodami. Byly testovány dva modely. Oba mají časově závislé řešení. První model jednorozměrného proudění byl sestaven v počítačovém programu Matlab SimHydraulics. Sestavení obvodu v tomto programu je jednoduché a intuitivní, výsledný model se velmi podobá reálnému hydraulickému schématu. Byly zhotoveny dvě varianty řešení. První počítá s nulovým obsahem vzduchu a modulem objemové pružnosti, který byl získán při měření rázu. Druhá varianta řeší teoretický modul pružnosti a objemový zlomek vzduchu $\alpha = 0,02$. Důležité je zvolit v nastavení správného numerického schéma (řešitele). Podstatný vliv na přesnost výpočtu má také počet segmentů u segmentovaného potrubí. Čím více je jich zvoleno, tím je výpočet přesnější, ale také se prodlužuje výpočetní čas.

Druhý matematický model, umožňující simulaci vícerozměrného proudění, byl vytvořen v softwaru ANSYS Fluent. V podkapitolách je popsána tvorba geometrie, výpočetní síť a nakonec nastavení zvolených okrajových podmínek. Z důvodů zkrácení výpočetních časů byla geometrie vytvořena ve 2D a osově symetrická.

Na konci diplomové práce jsou simulované dynamické průběhy tlaků a průtoku při hydraulickém rázu porovnány s naměřenými hodnotami a zhodnoceny výsledky. Lze konstatovat, že se velmi dobře shodují (rozdíly se ve většině případů pohybují do 5 %).

Významným přínosem práce je, že simulace hydraulického rázu jednorozměrným modelem (SimHydraulics) a vícerozměrným modelem (Fluent) jsou stejné kvality. Oba programy modelují reálný obvod, vstupní parametry hydraulických prvků jsou běžně určované statické charakteristiky, nejsou odhadovány ani dopočítávány žádné pomocné

parametry. To umožní modelovat dynamiku nově navrhovaného hydraulického obvodu a předvídat chování tlaků a průtoku v různých místech obvodu, tento pak optimalizovat a následně připravit konstrukční návrh obvodu k realizaci. Nutnou podmínkou je znalost charakteristik jednotlivých prvků obvodu.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí mé diplomové práce prof. RNDr. Miladě Kozubkové, CSc. za odborné vedení, cenné rady a čas věnovaný konzultacím při tvorbě této práce.

9. Seznam použité literatury

- [1] KOZUBKOVÁ, Milada. *Matematické modely kavitace a hydraulického rázu*. Ostrava, 2009, 130 s. ISBN 978-80-248-2043-9.
- [2] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování a simulace tekutinových systémů* [online]. Ostrava, 2014, 212 s. [cit. 2017-05-05].
- [3] FAJKA, Martin. *Měření ztrát v nízkotlakém hydraulickém systému s uvažováním hydrostatického tlaku*. Ostrava, 2015, 57 s. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Milada Kozubková.
- [4] BOJKO, Marian. *3D Proudění - ANSYS Fluent* [online]. Ostrava, 2012, 314 s. [cit. 2017-05-05]. ISBN 978-80-248-2607-3. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/3D-Bojko.pdf>
- [5] ANSYS Fluent. *Techsoft Engineering* [online]. Praha 4, ©2012-2014 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.techsoft-eng.cz/produkty/ansys/ansys-fluent/>
- [6] *ANSYS Fluent User's Guide* [online]. Release 15.0. 2013, 2692 s. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>
- [7] Wilo-Star-RS: Star-RS 25/4. *Wilo* [online]. WILO SE, 2016 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://productfinder.wilo.com/%20com/en/c0000000a0000166700020023/_000000040003031a0001003a/product.html#tab=product_datasheet
- [8] HORÁČKOVÁ, Miroslava. *Měření charakteristiky ventilu na vodní trati*. Ostrava, 2016, 45 s. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Marian Bojko.
- [9] JABLONSKÁ, Jana a Milada KOZUBKOVÁ. *Modelování a simulace tekutinových systémů: Návod do cvičení* [online]. Ostrava, 2016, 71 s. [cit. 2017-05-05].
- [10] RASZKA, Jiří. *Matematické modelování proudění přes porézní vrstvu v Ansys Fluent 13.0* [prezentace]. VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011 [cit. 2017-05-05].

[11] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin, FLUENT, CFX* [online]. Ostrava, 2008, 154 s. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Kozubkova-Fluent.pdf>

10. Seznam příloh

Příloha A. Specifikace prvků v obvodu

Nádrž (N)

- Výrobce: VŠB - Technická univerzita Ostrava
- Objem: 42 dm³



obr. 10.1 Nádrž (N)

Čerpadlo (HG)

- Výrobce: WILO
- Typ: WILO RS 25/4 PN 10
- Napájení: 230 V, 50 Hz
- Příkon: 30 / 46 / 65 W
- Jmenovité otáčky: 1200 / 1650 / 2000 min⁻¹



obr. 10.2 Čerpadlo (HG)

Clona (C)

- Výrobce: VŠB - Technická univerzita Ostrava
- Vnitřní průměr clony: 12,5 mm
- Světlost potrubí: 25,4 mm



obr. 10.3 Clona (C)

Diferenční manometr (DM)

- Výrobce: Honeywell
- Typ: ST 3000 STD924
- Měřicí rozsah: 0 - 100 kPa
- Napájení: 11 - 42,4 V
- Výstup: 4 - 20 mA



obr. 10.4 Diferenční manometr (DM)

Hadice (H)

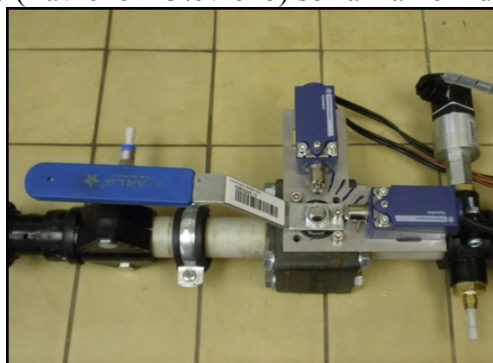
- Výrobce: Konekt Hradec Králové
- Typ: MP-EPDM 20
- Pracovní tlak: 2 MPa
- Vnitřní průměr: 25 mm
- Vnější průměr: 35 mm
- Délka: 48 m



obr. 10.5 Hadice (H)

Kulový kohout (KK)

- Výrobce: FLUIDTECHNIC BOHEMIA
- Typ: Star Line 133SGS
- Velikost: DN 25
- Na ventilu byly umístěny snímače polohy (Zavřeno - Otevřeno) se záznamem do PC.



obr. 10.6 Kulový kohout (KK)

Elektrický digitální tlakoměr (DT)

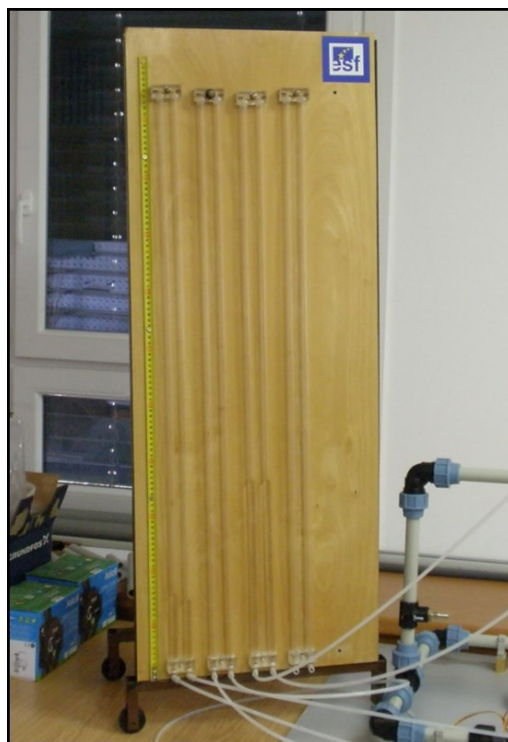
- Výrobce: CRESSTO
- Typ: SHD 511 P5UB D
- Měřicí rozsah: 0 - 100 kPa
- Napájení: 5 - 36 V
- Analogový výstup: 0 - 20 mA
- Digitální výstup: RS 485



obr. 10.7 Elektrický digitální tlakoměr (DT)

Obrácená U-trubice (U)

- Výrobce: VŠB - Technická univerzita Ostrava



obr. 10.8 Obrácená U-trubice (U)

Elektrický snímač tlaku (S₁, S₂, S₃)

- Výrobce: CRESSTO
- Typ: TMG 517 Z3G (S₃), TMG 518 Z3G (S₁, S₂)
- Měřicí rozsah: 0 - 100 kPa
- Napájení: 12 - 36 V
- Analogový výstup: 0 - 20 mA



obr. 10.9 Elektrický snímač tlaku (S₁, S₂, S₃)

Potrubí

- Výrobce: Wavin
- Typ: Ekoplastik
- Materiál: PP-R
- Rozměry: D 25 x 3,5 a D 32 x 4,4

Armatury (spojky, redukce)

- Výrobce: PCV Alfa s.r.o

Příloha B. Charakteristika čerpadla

Otáčky 1200 min ⁻¹	Měřené veličiny		Vypočtené veličiny						
Číslo měření	Průtok Q [m ³ ·h ⁻¹]	Tlakový spád Δp [Pa]	Průtok Q [m ³ ·s ⁻¹]	Rychlost v [m·s ⁻¹]	Dopravní výška H [m]	Měrná energie Y _č [J·kg ⁻¹]	Výkon Ph [W]	Příkon P [W]	Účinnost η [%]
1	0,68	9400	0,0001889	0,385	0,96	9,4	1,78	25,97	6,84
2	0,57	10700	0,0001583	0,323	1,09	10,7	1,69	25,55	6,63
3	0,47	12200	0,0001306	0,266	1,25	12,2	1,59	25,13	6,34
4	0,33	14700	0,0000917	0,187	1,50	14,7	1,35	24,50	5,50
5	0,20	16700	0,0000556	0,113	1,71	16,7	0,93	23,85	3,89
6	0,09	18700	0,0000250	0,051	1,91	18,7	0,47	23,27	2,01
7	0,00	22600	0,0000000	0,000	2,31	22,6	0,00	22,76	0,00

tab. 10.1 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot pro otáčky čerpadla 1200 min⁻¹

Otáčky 1650 min ⁻¹	Měřené veličiny		Vypočtené veličiny						
Číslo měření	Průtok Q [m ³ ·h ⁻¹]	Tlakový spád Δp [Pa]	Průtok Q [m ³ ·s ⁻¹]	Rychlost v [m·s ⁻¹]	Dopravní výška H [m]	Měrná energie Y _č [J·kg ⁻¹]	Výkon Ph [W]	Příkon P [W]	Účinnost η [%]
1	0,99	18300	0,0002750	0,560	1,87	18,3	5,03	35,23	14,29
2	0,98	18700	0,0002722	0,555	1,91	18,7	5,09	35,19	14,47
3	0,90	19700	0,0002500	0,509	2,01	19,7	4,93	34,85	14,13
4	0,74	21700	0,0002056	0,419	2,22	21,7	4,46	34,13	13,07
5	0,60	23400	0,0001667	0,340	2,39	23,4	3,90	33,45	11,66
6	0,39	26700	0,0001083	0,221	2,73	26,8	2,89	32,31	8,95
7	0,25	28700	0,0000694	0,141	2,93	28,8	1,99	31,49	6,33
8	0,13	30300	0,0000361	0,074	3,09	30,4	1,09	30,74	3,56
9	0,01	33500	0,0000028	0,006	3,42	33,6	0,09	29,95	0,31
10	0,00	33700	0,0000000	0,000	3,44	33,8	0,00	29,88	0,00

tab. 10.2 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot pro otáčky čerpadla 1650 min⁻¹

Otáčky 2000 min ⁻¹	Měřené veličiny		Vypočtené veličiny						
Číslo měření	Průtok Q [m ³ ·h ⁻¹]	Tlakový spád Δp [Pa]	Průtok Q [m ³ ·s ⁻¹]	Rychlost v [m·s ⁻¹]	Dopravní výška H [m]	Měrná energie Y _č [J·kg ⁻¹]	Výkon Ph [W]	Příkon P [W]	Účinnost η [%]
1	1,08	28200	0,0003006	0,612	2,88	28,3	8,48	44,15	19,20
2	1,07	28900	0,0002972	0,605	2,95	29,0	8,59	44,11	19,47
3	1,04	30100	0,0002897	0,590	3,07	30,2	8,72	44,00	19,82
4	0,85	32100	0,0002356	0,480	3,28	32,2	7,56	43,20	17,50
5	0,70	33300	0,0001950	0,397	3,40	33,4	6,49	42,53	15,27
6	0,54	34800	0,0001508	0,307	3,55	34,9	5,25	41,74	12,58
7	0,31	37100	0,0000861	0,175	3,79	37,2	3,19	40,46	7,90
8	0,17	38500	0,0000472	0,096	3,93	38,6	1,82	39,63	4,59
9	0,09	39600	0,0000250	0,051	4,04	39,7	0,99	39,13	2,53
10	0,00	41900	0,0000000	0,000	4,28	42,0	0,00	38,55	0,00

tab. 10.3 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot pro otáčky čerpadla 2000 min⁻¹

Výpočet pro první řádek tab. 10.3:

$$Q = v \cdot S \rightarrow v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{0,0003006}{\frac{\pi \cdot 0,025^2}{4}} = 0,612 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

$$\Delta p = H \cdot \rho \cdot g \rightarrow H = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} = \frac{28200}{998,2 \cdot 9,81} = 2,88 \text{ [m]}$$

$$Y_{\check{c}} = H \cdot g = 2,88 \cdot 9,81 = 28,3 \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

$$P_h = Q \cdot \rho \cdot Y_{\check{c}} = 0,0003006 \cdot 998,2 \cdot 28,3 = 8,48 \text{ [W]}$$

$$P = -16591648,35 \cdot Q^2 + 23634,4 \cdot Q + 38,55$$

$$P = -16591648,35 \cdot 0,0003006^2 + 23634,4 \cdot 0,0003006 + 38,55 = 44,15 \text{ [W]}$$

(konstanty získány z obr. 6.3)

$$\eta = \frac{P_h}{P} = \frac{8,48}{44,15} = 0,192 \cong 19,2 \text{ [%]}$$

Příloha C. Charakteristika clony

Otáčky 2000 min ⁻¹	Měřené veličiny		Vypočtené veličiny				
Číslo měření	Průtok Q [m ³ ·h ⁻¹]	Rozdíl výšek Δh [mm]	Tlakový spád Δp [Pa]	Průtok Q [m ³ ·s ⁻¹]	Průtok Q ² [m ⁶ ·s ⁻²]	Rychlost v [m·s ⁻¹]	Reynoldsovo číslo Re [-]
1	1,08	550	5385,8	0,00030	0,000000090	0,612	15307
2	1,06	500	4896,2	0,00029	0,000000087	0,599	14982
3	0,99	425	4161,7	0,00028	0,000000076	0,560	14006
4	0,90	360	3525,2	0,00025	0,000000063	0,509	12732
5	0,82	300	2937,7	0,00023	0,000000052	0,464	11601
6	0,72	260	2546,0	0,00020	0,000000040	0,407	10186
7	0,62	190	1860,5	0,00017	0,000000030	0,351	8771
8	0,53	150	1468,9	0,00015	0,000000022	0,300	7498
9	0,44	105	1028,2	0,00012	0,000000015	0,249	6225
10	0,36	80	783,4	0,00010	0,000000010	0,204	5093
11	0,26	55	538,6	0,00007	0,000000005	0,147	3678
12	0,20	30	293,8	0,00006	0,000000003	0,113	2829
13	0,12	20	195,8	0,00003	0,000000001	0,068	1698
14	0,07	10	97,9	0,00002	0,000000000	0,040	990
15	0,00	0	0,0	0,00000	0,000000000	0,000	0

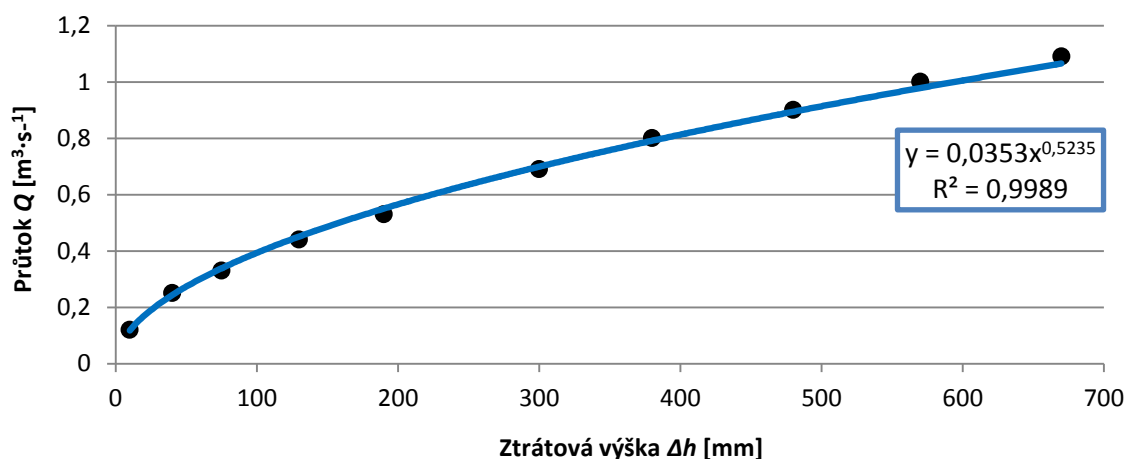
tab. 10.4 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot charakteristiky clony

Výpočet pro první řádek tab. 10.4:

$$\Delta p = \Delta h \cdot \rho \cdot g = \frac{550}{1000} \cdot 998,2 \cdot 9,81 = 5\,385,8 \text{ [Pa]}$$

$$Q = v \cdot S \rightarrow v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{0,00030}{\frac{\pi \cdot 0,025^2}{4}} = 0,612 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{0,612 \cdot 0,025}{0,000001} = 15\,307 \text{ [1]}$$



obr. 10.10 Cejchovní křivka clony

Příloha D. Výpočet ztrátového součinitele ζ a průtokového součinitele μ clony pro použití v matematických modelech:

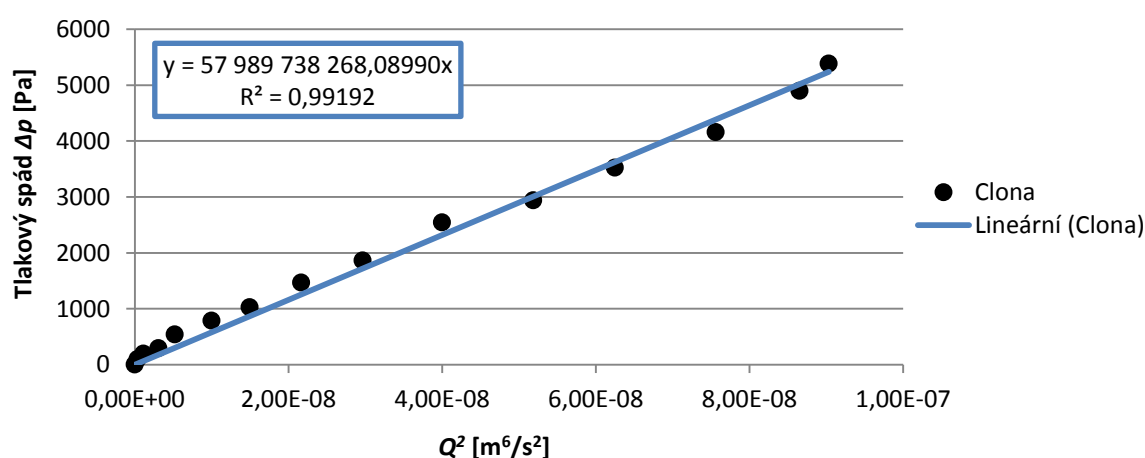
1) Vnitřní průměr použité clony je **0,0125 m**.

2) Plocha průtočného průřezu je tedy:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,0125^2}{4} = 0,00012272 \text{ [m}^2\text{]}$$

3) V programu MS Excel byla z naměřených hodnot vykreslena závislost tlakového spádu Δp na druhé mocnině průtoku Q^2 . Byla použita lineární spojnice trendu, zobrazena rovnice regrese a hodnota spolehlivosti

4) Z rovnice regresní funkce byla odečtena velikost odporu "R" (obr. 10.11).



obr. 10.11 Závislost tlakového spádu na druhé mocnině průtoku

5) Pomocí odporu "R" byla odvozena přibližná hodnota ztrátového součinitele ζ .

$$R = \frac{\rho \cdot \zeta}{2 \cdot S^2} \rightarrow \zeta = \frac{2 \cdot S^2 \cdot R}{\rho} = \frac{2 \cdot 0,00012272^2 \cdot 57\,989\,738\,268,08990}{998,2} = 1,749\,780 \text{ [1]}$$

6) Průtokový součinitel μ byl pobrobně odvozen v literatuře [2] a jeho konečný tvar je:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} = \frac{1}{\sqrt{1,749\,780}} = 0,755\,977 \text{ [1]}$$

Příloha E. Charakteristika kulového kohoutu

Číslo měření	Měřené veličiny		Vypočtené veličiny			
	Průtok $Q [l \cdot s^{-1}]$	Tlakový spád $\Delta p [Pa]$	Průtok $Q [m^3 \cdot s^{-1}]$	Průtok $Q^2 [m^6 \cdot s^{-2}]$	Rychlost $v [m \cdot s^{-1}]$	Reynoldsovo číslo $Re [-]$
1	1,045	2100	0,00105	0,0000010927	2,129	53237
2	1,001	1800	0,00100	0,0000010016	2,039	50970
3	0,987	1750	0,00099	0,0000009740	2,010	50262
4	0,895	1500	0,00090	0,0000008014	1,824	45592
5	0,820	1350	0,00082	0,0000006726	1,671	41767
6	0,745	1150	0,00075	0,0000005550	1,518	37943
7	0,669	950	0,00067	0,0000004470	1,362	34052
8	0,525	600	0,00053	0,0000002760	1,070	26758
9	0,367	350	0,00037	0,0000001347	0,748	18691
10	0,209	250	0,00021	0,0000000435	0,425	10619
11	0,086	150	0,00009	0,0000000074	0,176	4390
12	0,000	0	0,00000	0,0000000000	0,000	0

tab. 10.5 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot pro kulový kohout

Výpočet pro první řádek tab. 10.5:

$$Q = v \cdot S \rightarrow v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{0,00105}{\frac{\pi \cdot 0,025^2}{4}} = 2,129 [m \cdot s^{-1}]$$

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{2,129 \cdot 0,025}{0,000001} = 53\,237 [1]$$

Příloha F. Výpočet ztrátového součinitele ζ a průtokového součinitele μ kulového kohoutu pro použití v matematických modelech:

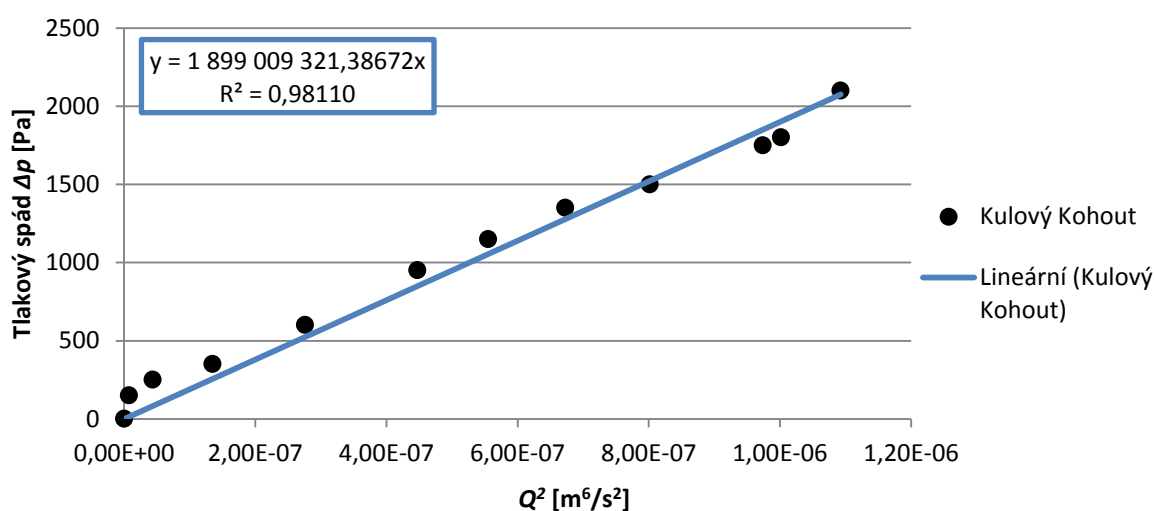
1) Vnitřní průměr použitého kulového kohoutu je **0,025 m**.

2) Plocha průtočného průřezu je tedy:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,025^2}{4} = 0,000491 \text{ [m}^2\text{]}$$

3) V programu MS Excel byla z naměřených hodnot vykreslena závislost tlakového spádu Δp na druhé mocnině průtoku Q^2 . Byla použita lineární spojnice trendu, zobrazena rovnice regrese a hodnota spolehlivosti

4) Z rovnice regresní funkce byla odečtena velikost odporu "R" (obr. 10.12).



obr. 10.12 Závislost tlakového spádu na druhé mocnině průtoku

5) Pomocí odporu "R" byla odvozena přibližná hodnota ztrátového součinitele ζ .

$$R = \frac{\rho \cdot \zeta}{2 \cdot S^2} \rightarrow \zeta = \frac{2 \cdot S^2 \cdot R}{\rho} = \frac{2 \cdot 0,000491^2 \cdot 1\,899\,009\,321,38672}{998,2} = 0,916\,810 \text{ [1]}$$

6) Průtokový součinitel μ byl pobrobně odvozen v literatuře [2] a jeho konečný tvar je:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} = \frac{1}{\sqrt{0,916\,810}} = 1,044\,384 \text{ [1]}$$